# técnica

351

associação dos estudantes do instituto superior técnico

outubro 1965

revista de engenharia

# CIMENTO SECIL

SECIL

Fábrica:

Outão — Setúbal

Telef. 228824/5

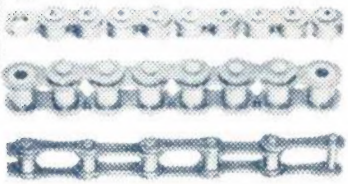
Escritório:

R. do Comércio, 56-3.º

LISBOA 2

Telef. 328201/2/3

REGINA REX



CORRENTES

DE TRANSMISSÃO

PARA

INDÚSTRIA, AGRICULTURA, ETC.

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS

AUTO-LUSITANIA

ALFREDO DUARTE, LDA.

AVENIDA DA LIBERDADE, 73-79

LISBOA

confiança para a construção com

materiais novobra

EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

pavimentos

coberturas

vigas de grande vão

asnas

perfis

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS, NOVOBRA, LDA.

AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100, 5.º D.-TEL. 774832/766446-LISBOA-5

gepoc

GABINETE DE ESTUDOS, PROJECTOS E ORÇAMENTOS PARA A CONSTRUÇÃO

Encarrega-se de projectos de:

- Estruturas em Betão Pré-esforçado
- Estruturas Metálicas
- Edifícios Industriais
- Edifícios de Habitação e Escritórios
- Condutas, Reservatórios e Silos
- Pontes
- Recalçamento de Prédios
- Entivações e Cofragens Especiais
- Préfabricação

AV. ELIAS GARCIA, 162-1.º ESQ.

LISBOA • TEL. 771053

# técnica

*NÚMERO 351 * OUTUBRO DE 1965 * ANO XL * VOLUME XXVII * PUBLICAÇÃO MENSAL*

**Director**
Assis Farinha Martins

**Administrador**
J. M. Costa Monteiro

**Secretário**
V. M. Martins Pinto

**Redactores**
Amadeu M. R. Marrecas
Amílcar S. Martins
João C. V. F. Antas
Mário P. M. Garcia

**Editor e Proprietário**
Associação dos Estudantes
do Instituto Superior Técnico

**Redacção e Administração**
Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

★

**Assinaturas**

| | 3 N.os | 5 N.os | 10 N.os |
|---|---|---|---|
| Continente e Ilhas | 37$50 | 60$00 | 110$00 |
| Ultramar, Brasil e Espanha | — | 65$00 | 120$00 |
| Estrangeiro | — | 70$00 | 130$00 |

**Número avulso — 15$00**

★

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

*Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais, 103 — Lisboa*

# SUMÁRIO

**1** *MANUEL ROCHA* — **Medição de deformações e de tensões «in situ»**
In situ stress and strain measurements

**27** *ISABEL GAGO* — **Pequenas notas sobre a distribuição da corrente na célula de Hull-Roussalot**
Brief notes on current distribution in Hull - Rousselot's cell

**43** *ANTÓNIO QUINTELA* — **Nota sobre escoamentos permanentes em canais de declive fraco munidos de comporta com abertura inferior**
Note on steady free surface flow in a mild slope channel provided with sluice gate

**49** *H. TELLES ANTUNES* — **Aquecimento de transformadores imersos em óleo**
Heating of transformers with oil insulation

*

**60** **Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional**

**61** **Do Mundo Técnico**
Produtividade — Utilização dos tiristores nos reguladores de tensão dos filtros electrostáticos — Construção de linhas de transporte de energia a 735 kV, no Canadá — «Vibrachopper»

**67** **Biblioteca**

**CAPA:** Fábrica de fiação e tecidos Riopele. Secção de acabamento de tecidos com capacidade para dez milhões de metros por ano.

# Índice Alfabético dos nossos anunciantes


## A

Pág.

A. Johnson & Co (Portugal), Ltd. . . XXXIV
Asea Eléctrica Ld.ª . . . . . XVI
Auto-Lusitânia . . . . . 2.ª da capa

## B

B. P. . . . . XXVI

## C

CIDEX . . . . . IV
CIDLA . . . . . XXX
Cimento Secil . . . . . 2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos . . VIII
Companhia Portuguesa de Fornos Eléctricos . . . . . XXXVI
Companhia Portuguesa de Trefilaria XVIII
Companhia União Fabril . . . . . XIV
C. Santos, Ltd.ª . . . . . VI e VII
Construções Técnicas . . . . . XXIX

## E

Electrotécnicos Reunidos . . . . . XXXI
Electro-Arco, Ltd.ª . . . . . IV
Empresa de Cimentos de Leiria . . XXXII
Empresa Electro Cerâmica . . . . . XXXIII
Empresa de Produtos Asfálticos. . . X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Ltd.ª . . . . . 3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos . . . . . XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações . . . . . XX

## F

Fábrica Portugal . . . . . II
Fanafel . . . . . XVI
Fássio, Lda. . . . . XX
Fundações Franki, Lda. . . . . I

## G

Gerindustria . . . . . XLI
George Fischer . . . . . IX
GEPOC . . . . . 2.ª da capa
Guedes & Almeida, Lda. . . . . XXXV

## H

Harker Sumner & C.ª, Ltd. . . . . XXXVII

## I

Pág.

I. C. I. . . . . XXXV
Impermeábilis . . . . . XVIII
Instrom . . . . . XXXIX
Isola . . . . . XXVIII
Isolux, Lda. . . . . XL

## J

J. J. Gonçalves, Suc. . . . . XXV
Jayme da Costa, Lda . . . . . XV
Johann Keller . . . . . XLII

## M

Matafil . . . . . XLII
MAGUE . . . . . XIII
Monteiro Gomes, Lda. . . . . XXXVIII
Monterroso & C.ª, Lda. . . . . XL

## N

Novobra, Lda. . . . . 2.ª da capa

## P

Pévolon . . . . . XXVIII

## Q

Quimicor, S.A.R.L. . . . . XIX

## R

Renoluz . . . . . XVIII

## S

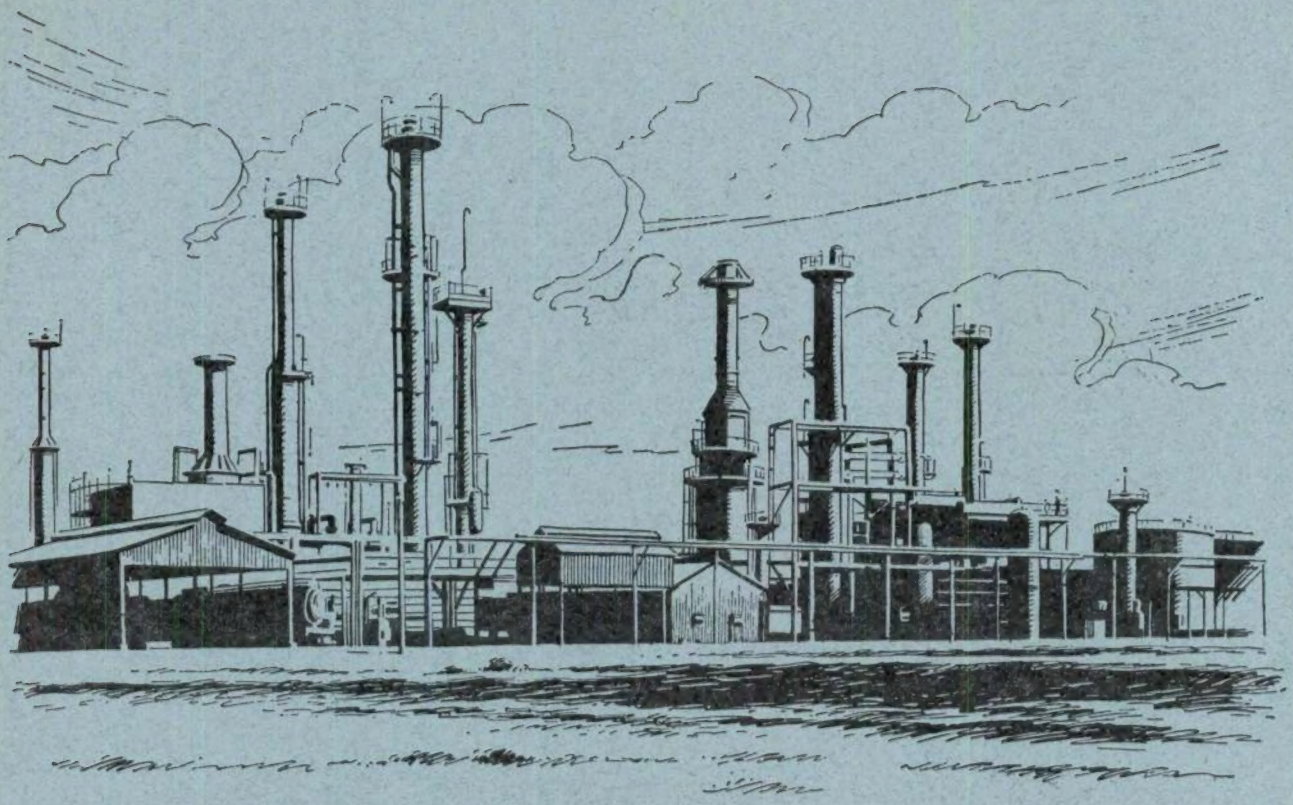
Shell . . . . . XXVII
Sociedade de Electricidade Brown Boveri . . . . . 4.ª da capa
Soc. Michaelis de Vasconcelos . . . XII
Sociedade Industrial Metalúrgica . XXXIII
Sociedade Portuguesa Cavan . . . VIII
Sondagens e Fundações A. Cavaco . IV
Sondagens Ródio, Ltd.ª . . . . . XXXIII
Sotécnica . . . . . XLII
Standard Eléctrica . . . . . VII
S. T. E. T. . . . . XXI

## V

Vasco Pessoa, Lda. . . . . XVIII

## W

Wild Portugal, Lda. . . . . XVII



Refinaria da Sonarep
(Matola — Moçambique)


Assente sobre

# ESTACAS FRANKI

FUNDAÇÕES FRANKI, L.DA

Rua Braamcamp, 13, 3.°
LISBOA

★

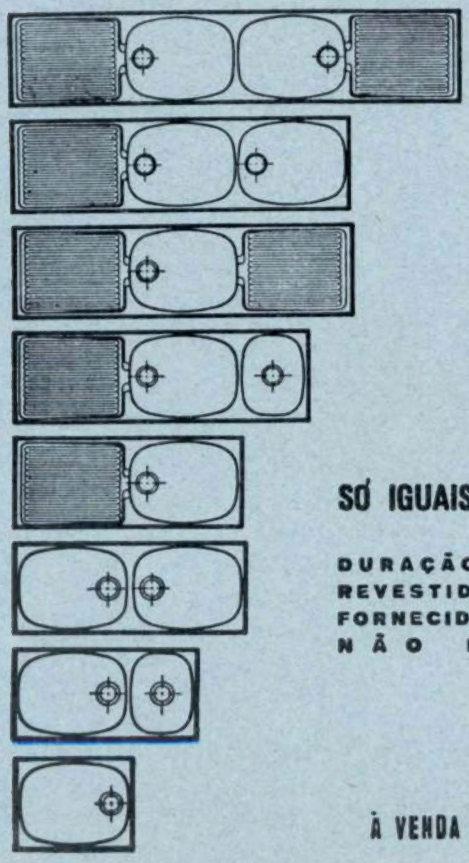
Telef. PPC 734112
End. Teleg. «FRANKI»

**USE NA SUA COZINHA UM ELEGANTE LAVA-LOUÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL**

CONCEBIDO PELA

# FABRICA PORTUGAL

PARA MODERNIZAR OS LARES DE PORTUGAL



APRESENTADOS EM

## 8 MODELOS

"STANDARD"

EXECUTAM-SE FORA DE SÉRIE, MODELOS ESPECIAIS PARA GRANDES INSTALAÇÕES

**SÓ IGUAIS AOS MELHORES ESTRANGEIROS**

DURAÇÃO ILIMITADA • HIGIÉNICOS
REVESTIDOS DE ISOLAMENTO ESPECIAL
FORNECIDOS COM SIFÃO DE SEGURANÇA
NÃO PARTEM A LOUÇA

À VENDA NAS BOAS CASAS DA ESPECIALIDADE

TOURNAPULLS
BULLDOZERS
MOTOR-SCRAPERS
TRACTORES
MOTO NIVELADORAS
CAMIONS BASCULANTES

**DUMPERS**

Capacidades de 10 a 120 Tons

---

**"BROOMWADE"**

**COMPRESSORES**
**PORTÁTEIS E FIXOS**
**FERRAMENTAS PNEUMÁTICAS**

Até 60 M3/MIN

**GUEDES & ALMEIDA, LDA. + R. Áurea, 181-2.° — Tel. 32 78 45 + LISBOA 2**

# Bombas centrífugas «PACIFIC»

**Construídas por**

**Batignolles - Chatillon**

**Especialmente destinadas para:**
— Petróleos
— Indústrias químicas
— Construções navais
— Centrais eléctricas
— Alimentação de caldeiras
— Etc., etc.

**Sob as condições de funcionamento seguintes:**
— Débitos: 1 m³/h a 10.000 m³/h
— Pressões: altas e baixas
— Temperaturas: −180° C + 500° C
— Líquidos: corrosivos ou não

**Para estudos e orçamentos, consultar o representante em Portugal:**

CIDEX — Comércio Internacional
e Representações Industriais, Lda.

Av. Casal Ribeiro, 46-2.°/Telef. 73 53 07/LISBOA 1

Pesquisas e captações de água

Sondagens

Rebaixamento de níveis aquíferos

Injecções e consolidações de terrenos

Fundações

Estacas de betão

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA-1
— TELEF. 73 35 48 - 5 95 62 - 55 36 73

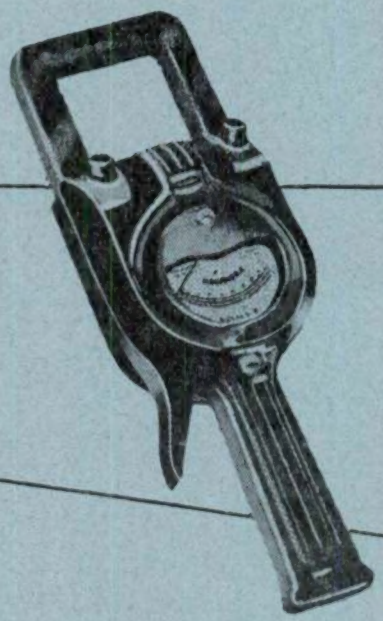
# ELECTRO-ARCO
LIMITADA

ELECTRODIOS
POSTOS E ACESSORIOS
PARA A SOLDADURA ELECTRICA

MATERIAL APROVADO PELO
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
VENDA NOVA — AMADORA
LISBOA
RUA SILVA CARVALHO, 239 — TEL 683649
PORTO
RUA DO BOLHÃO, 216 — TEL 21277

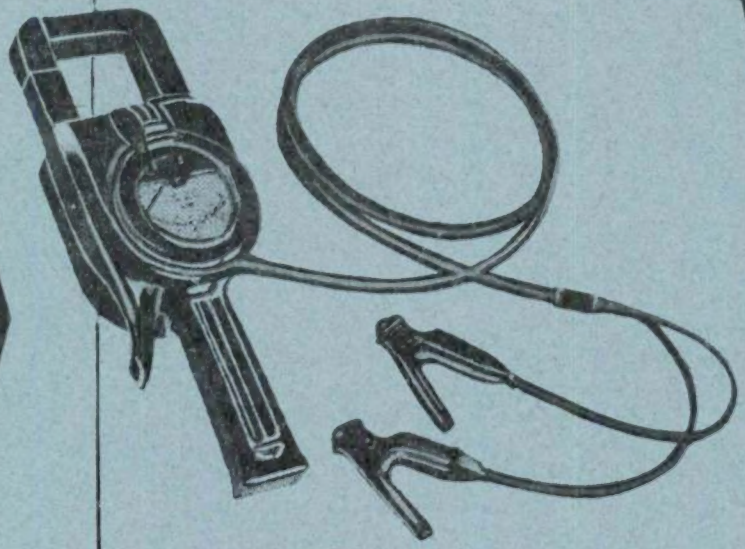
# PINÇAS FERRANTI



**PINÇAS VOLT — AMPERIMÉTRICAS**

7 ESCALAS

| EM AMPÈRES | EM VOLTS |
|---|---|
| 0 – 10 AMPS. | 0 – 150 V |
| 0 – 25 » | 0 – 600 » |
| 0 – 100 » | |
| 0 – 250 » | |
| 0 – 1000 » | |



**PINÇA WATTIMÉTRICA**

7 ESCALAS

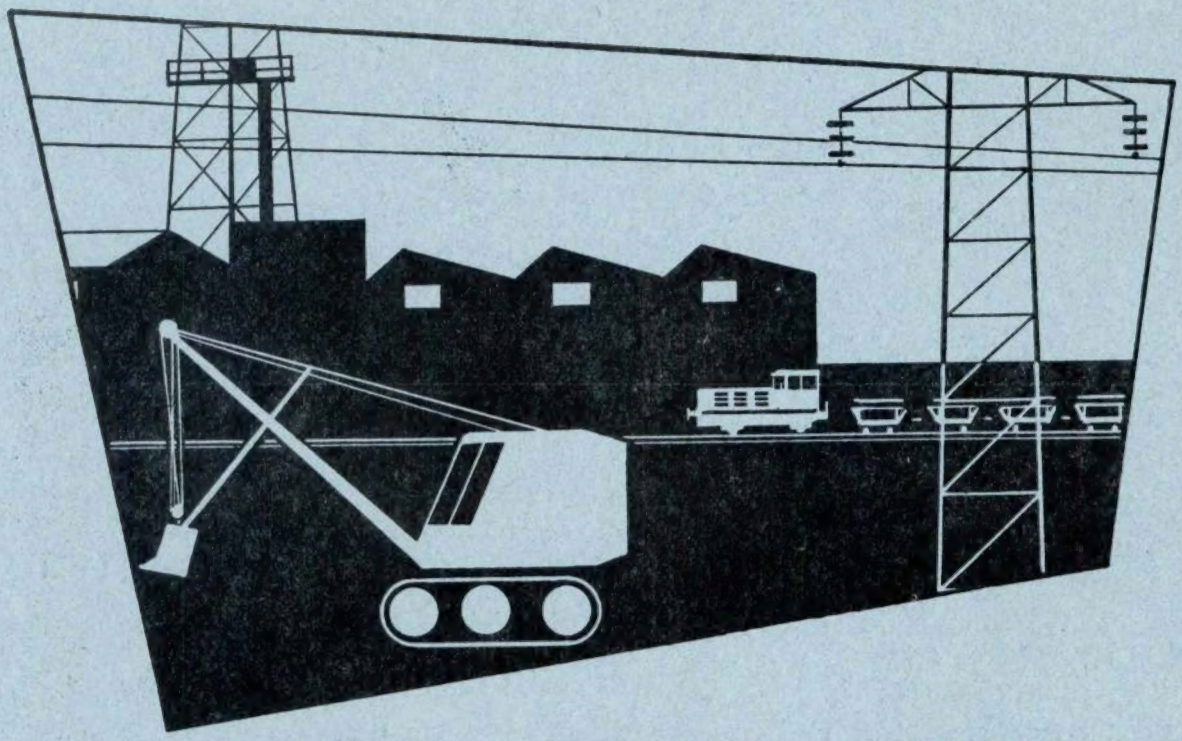
0 – 3 KW
0 – 6 »
0 – 12 »
0 – 30 »
0 – 60 »
0 – 120 »
0 – 300 »

REPRESENTANTES:

**C. SANTOS, S. A. R. L.**

29, AVENIDA DA LIBERDADE, 41 — LISBOA

DIVISÃO MARÍTIMA E INDUSTRIAL
AVENIDA DA LIBERDADE, 29-41 — LISBOA
160, RUA STA. CATARINA, 168 — PORTO



# MERCEDES-BENZ

## MOTORES INDUSTRIAIS DIESEL

MOTORES PARA TODAS AS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS
FAMOSOS EM TODO O MUNDO PELA SUA GRANDE ROBUSTÊS, ECONOMIA
DE CONSUMO E FACILIDADE DE MANUTENÇÃO
MODELOS DESDE 15 A 2.500 H. P.

**EM ARMAZÉM:**

| | |
|---|---|
| MODELO M B 841 B ..... | 25 H. P. — 1.000 R. P. M. |
| MODELO M 202 B ..... | 55 H. P. — 1.200 R. P. M. |
| MODELO M 203 B ..... | 90 H. P. — 1.200 R. P. M. |
| MODELO M 204 B ..... | 120 H. P. — 1.200 R. P. M. |

OUTROS MODELOS PARA ENTREGA MUITO RÁPIDA

MOTORES A 4 TEMPOS · ARREFECIMENTO POR ÁGUA
ARRANQUE A AR COMPRIMIDO OU ELÉCTRICO

REPRESENTANTES C. SANTOS, S. A. R. L. — DIVISÃO MARÍTIMA E INDUSTRIAL

29, AV. DA LIBERDADE, 41 — LISBOA
160, R. DE S.TA CATARINA, 168 — PORTO

# E NÃO FOMOS SÓ NISTO OS PRIMEIROS!

EM 1930 EXPERIMENTÁMOS O PRIMEIRO TUBO COM VARREDURA E SINCRONIZAÇÃO ELECTRÓNICA. FOI FARNSWORTH O CIENTISTA A QUEM SE DEVE A TELEVISÃO DE HOJE. A ITT JÁ OBTEVE 20.000 PATENTES DOS SEUS INVENTOS E APERFEIÇOAMENTOS EM RADAR, TV, NAVEGAÇÃO AÉREA, LAZERS, ETC. TUDO ISTO SERIA DE ESPANTAR SE NÃO SE TRATASSE DO RESULTADO OBTIDO POR 200.000 PESSOAS ESPALHADAS POR MAIS DE 100 FÁBRICAS ESPALHADAS POR 51 PAÍSES

A *Standard Electrica, S.A.R.L.*

É UMA ASSOCIADA DA **ITT**

## O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

**permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos**

**Estude a vantagem do emprego do**

# CIMENTO BRANCO LUSO

**Consulte os distribuidores gerais**

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

# CAVAN

SOCIEDADE PORTUGUESA

✱

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

✱

RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A
TELEF. 47812-50129
LISBOA

GM 1292/5

**Georges Fischer Sociedade Anónima, Schaffhouse (Suiça)**

Telefone: (053) 5 60 31 / 5 70 31 Telegrammas: Geofischer Telescriptôr: 5 29 15 geofischer schf

# Celulite

ISOLAMENTO TÉRMICO DAS CONSTRUÇÕES

PAVIMENTOS

*

TECTOS

*

PAREDES

*

CÂMARAS FRIGORÍFICAS

*

ISOLAMENTOS INDUSTRIAIS

**Terraços e pavimentos isolados com CELULITE no edifício da Comp.ª de Seguros Fidelidade — P. das Águas Livres — Lisboa**

SETH, LDA. • RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.° • TEL. 73 01 56 — LISBOA

---

Para impermeabilizar terraços, paredes, fundações, etc.

COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA

TELEF. 73 0156 TELEG. EPALDA — LISBOA

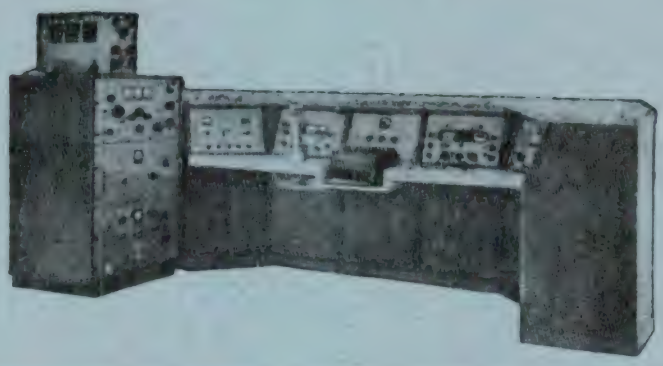
EMPREZA DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS

IMPERMEABILISADOR

**IMEPA**

RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.º-LISBOA

FÁBRICA EM SACAVÉM



## Comunicações

**equipamentos**
**e sistemas completos**

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

**THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION**

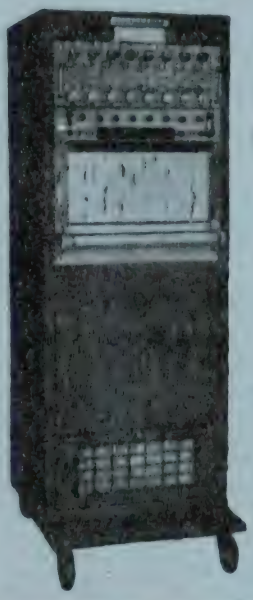
**HEWLETT hp PACKARD**

**aparelhagem electrónica de medida e registo**

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador digital Dymec

Registador Sanborn



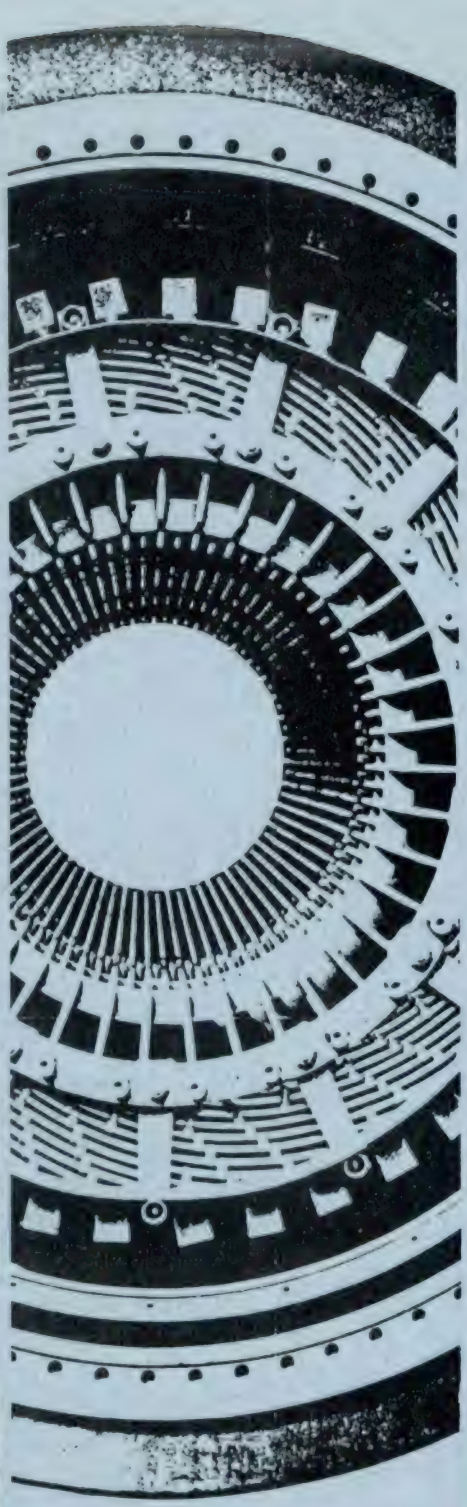
Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

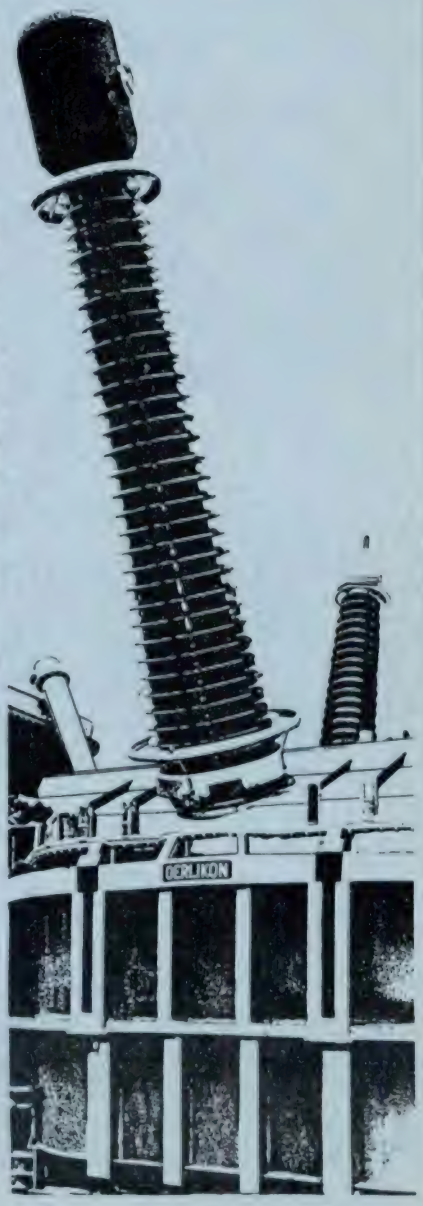
**TELECTRA** EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

# Oerlikon

**na vanguarda em maquinaria eléctrica pesada, aparelhos, transformadores e equipamentos de tracção**



**Ateliers de Construction Oerlikon Zurich/Suiça**




Companhias associadas em toda a parte do mundo

Em Portugal e Ultramar:
Soc. Mich. de Vasconcellos Lda.
Lisboa e Porto

técnica

NUMERO 351 * OUTUBRO DE 1965 * ANO XL * VOL. XXVII * DIRECTOR: ASSIS FARINHA MARTINS

C. D. U. 624.058

# MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES E DE TENSÕES «IN SITU» *

por MANUEL ROCHA

Director, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

RESUMO

*No presente trabalho apresenta-se a posição actual do problema da medição de deformações e de tensões em estruturas, sobretudo com base na experiência colhida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

*Passam-se em revista os tipos de extensómetros mais correntemente usados, analisa-se a influência das suas dimensões, forma e rigidez na medição das deformações e discute-se o problema de correcção das extensões medidas.*

*É exposto um método de cálculo de tensões, para o caso do betão, tendo em conta a fluência deste material. Trata-se também o problema da medição directa de tensões e apresentam-se alguns tipos de tensómetros.*

SYNOPSIS

*The present position of problem of strain and stress measurements in structures is described, on basis above all on the experience of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil, of Lisbon.*

*The author reviews the most currently used types of strain meters, studies the influence of their dimensions, shape and rigidity on the measurement of strains and discusses the problem of correcting the measured values.*

*A method for calculating stresses in concrete is discribed, in which the creep of this material is taken into account. The problem of the direct measurement of stresses is also discussed and some types of stress meters are presented.*

## 1. INTRODUÇÃO

O problema da medição de deformações e de tensões «in situ», isto é, em estruturas reais, vai ser tratado sobretudo com base na experiência do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (L. N. E. C.), de Lisboa.

Na observação de uma estrutura a medição de deformações e de tensões é acompanhada, em regra, da medição de outras grandezas, tais como deslocamentos lineares e angulares, movimento de juntas, abertura de fendas, temperaturas, humidades, etc. De um modo geral, a observação de uma estrutura pode visar ou a apreciação da sua segurança em serviço ou a aquisição de um melhor conhecimento do seu comportamento com vista a futuros projectos.

---

* Lição proferida num curso internacional sobre análise numérica e experimental de tensões, organizado em 1964 pela Universidade de Swansea, Grã-Bretanha. Constitui o cap.º 17 da obra «Stress analysis, recent developments in numerical and experimental methods», editada em 1965 por John Wiley and Sons, Ltd.

No primeiro caso não é muitas vezes necessário proceder à medição de deformações e de tensões, bastando a determinação de deslocamentos. De facto, estes constituem um aferidor global do funcionamento da estrutura e o seu confronto com os valores do projecto permite verificar se ela está a comportar-se de acordo com as hipóteses formuladas. Salvo casos especiais, enquanto os deslocamentos de uma estrutura não apresentarem valores apreciàvelmente superiores aos previstos não se põe o problema da segurança.

Quando se deseja melhorar o conhecimento do comportamento de uma estrutura é necessário, em regra, empreender programas de observação mais desenvolvidos, incluindo a medição de deformações e tensões. A grande importância desta medição é afinal a consequência de os engenheiros procurarem sempre interpretar o funcionamento das estruturas e dimensioná-las a partir da maneira como as forças exteriores se propagam no seu interior, isto é, a partir do campo de tensões gerado por essas forças.

Deve notar-se que a observação de deformações e de tensões não dispensa, em geral, a dos deslocamentos. De facto, estes podem evidenciar anomalias que ocorram em regiões onde não tenham sido colocados aparelhos para medição daquelas grandezas.

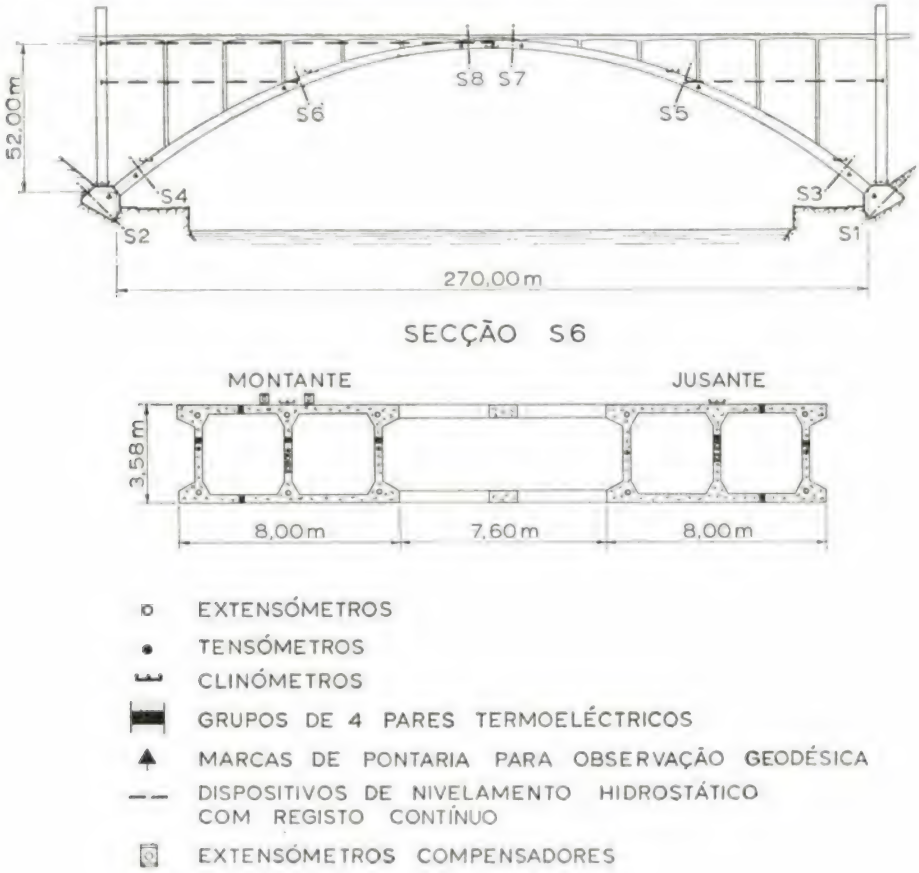



Fig. 1

Na fig. 1 apresenta-se um programa típico de observação de uma ponte de betão armado. Trata-se da ponte da Arrábida, um arco com o vão de 270 m recentemente construído em Portugal. O programa foi preparado com vista a avaliar a segurança da ponte antes e depois da construção e a estudar diversos problemas, em especial a repercussão da fluência do betão. Foram observadas as secções transversais S1 a S8, mostrando a figura a disposição dos instrumentos colocados na secção S6. Instalaram-se extensómetros, tensómetros, clinómetros, pares termoeléctricos para a determinação da temperatura a várias profundidades, miras para a observação geodésica dos deslocamen-

tos, níveis hidrostáticos para o registo contínuo dos deslocamentos verticais e dispositivos para a correcção das leituras dos extensómetros. A fig. 2 diz respeito à observação dos cimbres de aço da mesma ponte. Foram medidas tensões por meio de alongâmetros em dez secções transversais, seis das quais se mostram na figura, e nos cabos de montagem do cimbre. A mesma figura mostra ainda um pormenor do dispositivo usado nas medições nos cabos.

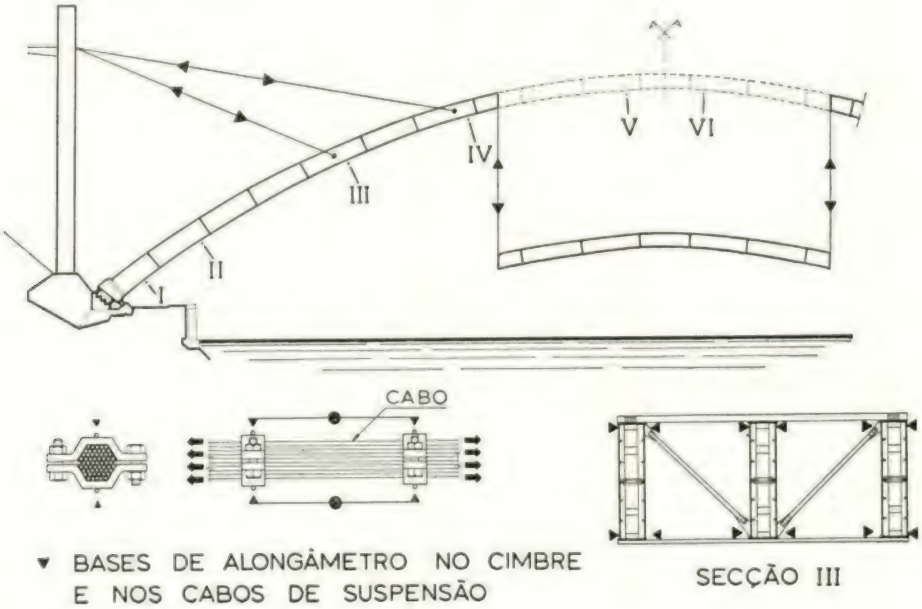



Fig. 2

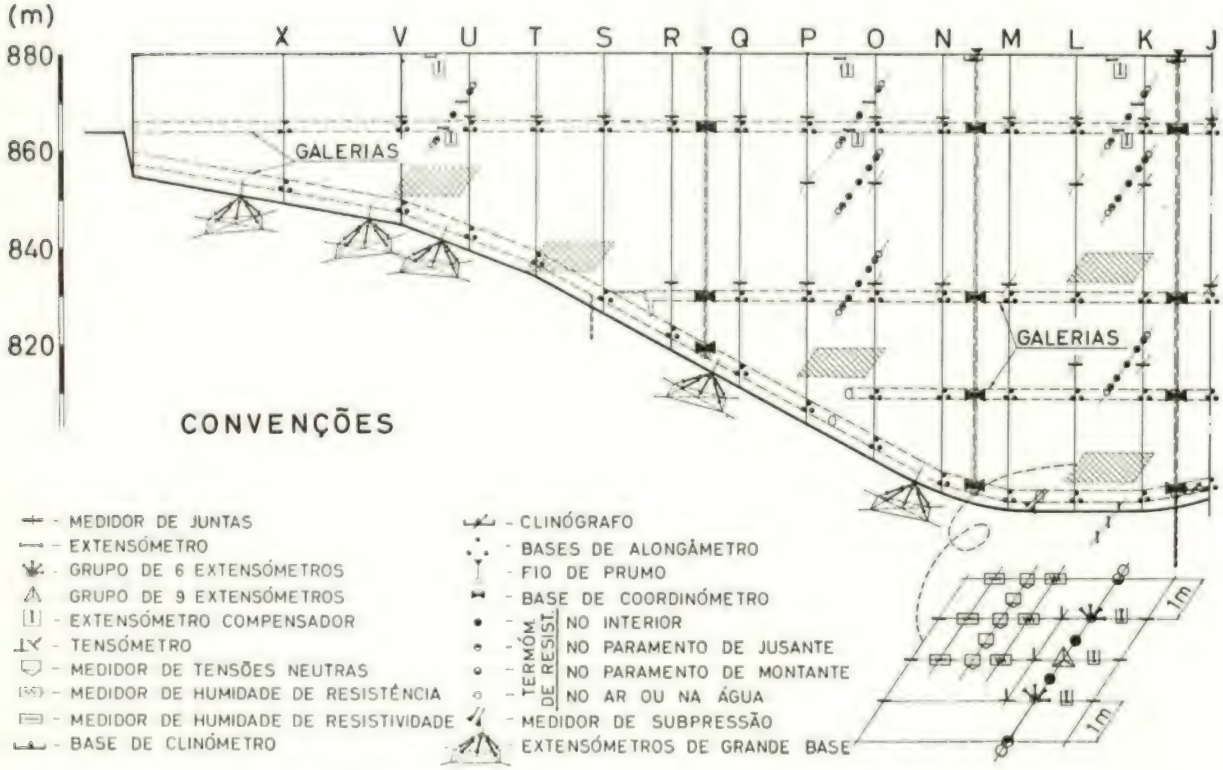



Fig. 3

No campo da engenharia civil as estruturas que mais exaustivamente se observam são as barragens-arco, devido à complexidade do seu comportamento e às grandes responsabilidades em jogo. A título de exemplo apresenta-se na fig. 3 o plano de observação da barragem de Alto Rabagão, construída no norte de Portugal. Como se pode notar, vão ser observadas numerosas grandezas, implicando a colocação de muitos aparelhos. A sua disposição nas áreas sombreadas, onde estão mais concentrados, encontra-se indicada no canto inferior direito da figura. Estão a ser instalados medidores de juntas entre os blocos contíguos da barragem, extensómetros em grupos de seis em pontos a 1 m da superfície e em grupos de nove em pontos do interior da barragem, extensómetros correctores, tensómetros, medidores de tensões neutras, medidores de humidade por meio de variação de resistência e de resistividade, bases para clinómetro, clinógrafos, bases para alongâmetro para medição da abertura das juntas à superfície, fios de prumo a observar por meio de coordinómetro, termómetros de resistência e medidores de subpressão. Foram instalados grupos de cinco extensómetros com grande base de medida em diversos pontos do interior da fundação.

Consideramos da maior importância para o progresso da engenharia civil a observação das estruturas pois que o presente conhecimento do seu comportamento real é indubitàvelmente precário, em especial o comportamento a longo prazo e o comportamento sob a acção de solicitações de ocorrência pouco frequente, como sismos e ventos de grande intensidade.

## 2. GENERALIDADES SOBRE A MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES

O conhecimento das tensões desenvolvidas nas estruturas tem a maior importância para o engenheiro. Infelizmente, a medição directa de tensões encontra ainda hoje sérias limitações, o que obriga a determiná-las a partir da medição de deformações, a qual assume assim grande relevância. Esta determinação indirecta das tensões é fácil quando as deformações possam supor-se elásticas no ponto considerado, mas no caso contrário encontram-se dificuldades. Tratar-se-á mais adiante do cálculo das tensões a partir da medição de deformações.

A medição de deformações requer uma técnica muito delicada por os seus valores serem em geral muito reduzidos nas estruturas em serviço. Por outro lado, fazendo-se essa medição nas condições dos estaleiros, os extensómetros têm de ser capazes de resistir a vibrações, choques, etc., sendo as variações de temperatura e a humidade outros factores perturbadores.

No entanto, dispõe-se hoje de técnicas de confiança para a medição de deformações em pequenos intervalos de tempo, da ordem de grandeza de algumas horas ou dias. É nas medições a longo prazo que se encontram ainda dificuldades, mesmo quando são usadas as técnicas mais evoluídas.

Deve frisar-se que as observações a longo prazo são muito importantes, dado que algumas solicitações são aplicadas lentamente, como por exemplo o peso próprio de uma estrutura, a pressão hidrostática sobre as barragens, os assentamentos de fundações, as variações de temperatura e as forças de percolação numa massa de terra. Além disso, em materiais como o betão, os solos e as massas rochosas, é necessário muitas vezes considerar deformações função do tempo.

Do ponto de vista das técnicas a adoptar convém analisar separadamente as medições de deformações na superfície das estruturas e em pontos do seu interior.

As medições na superfície são muito comuns e existe para elas grande variedade de extensómetros. Apresentam a vantagem de não exigirem a montagem de aparelhos quando da construção, como acontece com as medições em pontos do interior e, além disso, têm a seu favor o facto de as deformações mais elevadas ocorrerem usualmente na superfície das estruturas. Em contrapartida apresentam o inconveniente, particularmente sério nas observações a longo prazo, de as leituras dos extensómetros serem perturbadas pelas variações de temperatura do ar e por outros factores como choques, vento, etc.

A medição de deformações em estruturas metálicas é sempre feita na superfície. Nas estruturas de betão também são feitas com frequência medições na superfície, mas é considerado preferível deixar extensómetros incorporados no betão durante a construção, sobretudo nas observações a longo prazo. As medições no interior do betão permitem não só reduzir as perturbações já refe-

ridas, mas também as resultantes da fissuração do material à superfície devida às solicitações aplicadas e à secagem. Nos maciços rochosos e de terra as deformações são sempre medidas no seu interior, não só para evitar as perturbações das observações na superfície, mas também em virtude do carácter tridimensional dos equilíbrios.

## 3. TIPOS DE EXTENSÓMETROS MAIS CORRENTES

Não se vai procurar ser exaustivo na enumeração dos extensómetros usados nas medições «in situ». Referir-se-ão apenas os que são mais vulgares e oferecem maiores garantias de fidelidade e precisão.

### a) *Extensómetros mecânicos*

Os extensómetros mecânicos mais comuns são aqueles em que a deformação é medida por meio de um deflectómetro. Na fig. 4 apresenta-se um extensómetro aperfeiçoado no L.N.E.C. e usado nas observações de superfície, principalmente em estruturas metálicas. Como se vê, as pontas de aplicação do aparelho comportam uma cavidade hemisférica destinada a apoiar-se em esferas de aço fixa-

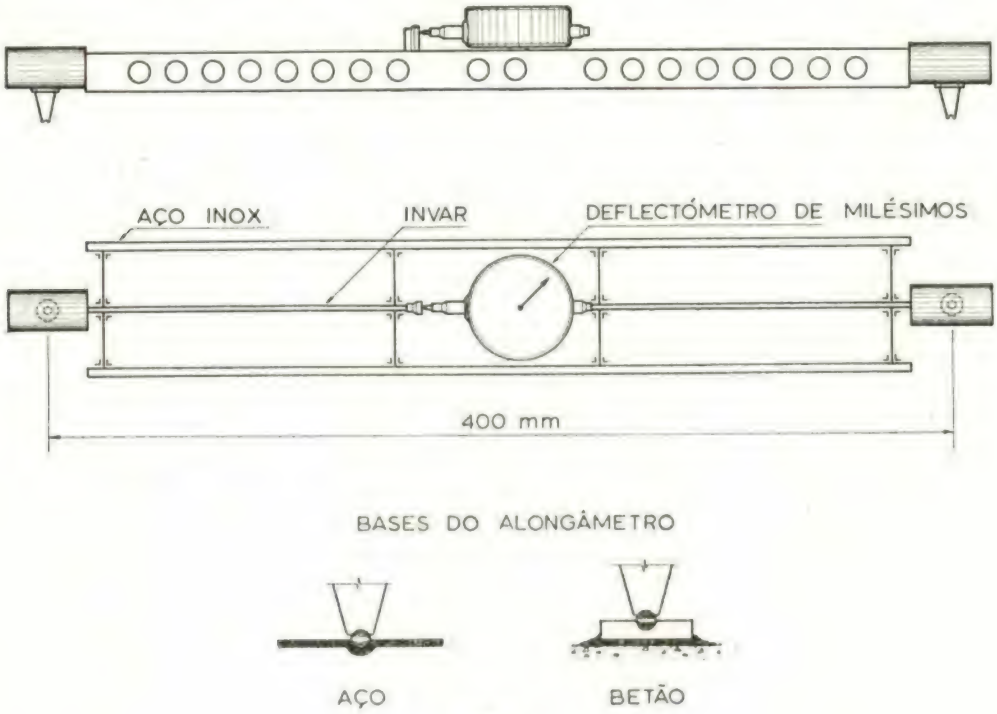



Fig. 4

das na superfície do elemento a observar. Este tipo de apoio contribui para melhorar substancialmente a precisão. A fig. 5 mostra a maneira como as esferas, geralmente de 3 mm de diâmetro, são fixadas às superfícies metálicas: faz-se uma cavidade cónica utilizando as ferramentas apresentadas e nela se insere a esfera. No caso do betão colam-se na superfície placas metálicas delgadas com esferas inseridas (fig. 4). Quando o aparelho é aplicado sucessivamente nas mesmas condições obtêm-se dispersões de leitura que vão de 3 $\mu$ a 10 $\mu$, conforme a posição da superfície onde são feitas as observações e a experiência do observador. Como as medições são sempre feitas em relação a uma barra padrão, obtêm-se precisões de leitura das deformações que vão de cerca de 12 $\mu$ a 40 $\mu$, o que corresponde, para bases de medida de 40 cm, a deformações unitárias que vão de $25 \times 10^{-6}$ a $100 \times 10^{-6}$. Em regra esta precisão é satisfatória na observação de estruturas metálicas (fig. 6). As

estruturas de betão exigem geralmente uma precisão mais elevada devido aos valores mais reduzidos das deformações.

O extensómetro descrito é essencialmente análogo a outros usados em diversos países (1) (2) (3). A medição de deformações por meio de tais aparelhos é muito simples e de confiança, mesmo

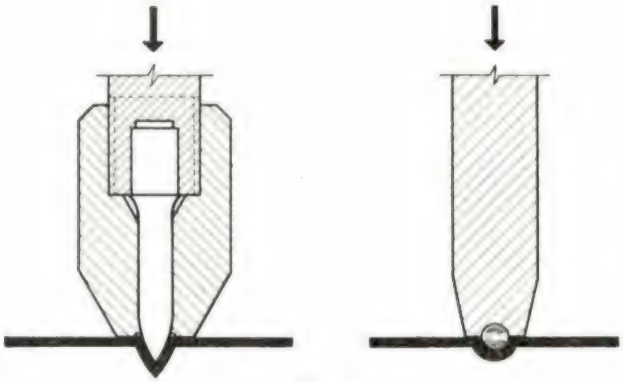


Fig. 5

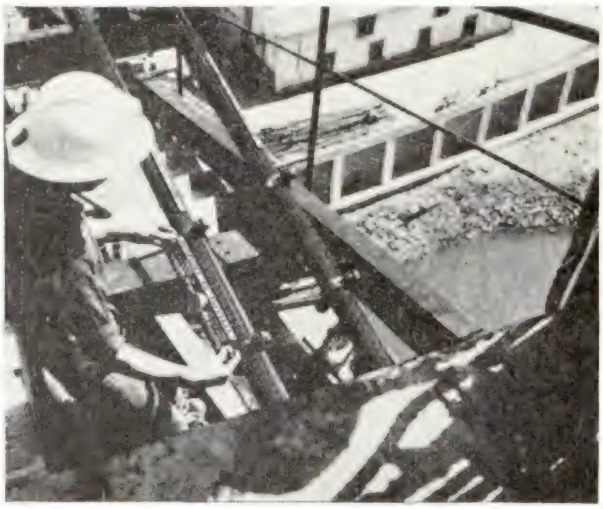


Fig. 6

para medições a longo prazo, e bastante económica. Contudo, além de a sua precisão ser nalguns casos insuficiente, só pode ser aplicado em pontos acessíveis a um observador e empregado em medições estáticas. As bases de medida usadas vão de alguns centímetros até cerca de um metro, estando as mais comuns compreendidas entre 10 e 30 cm.

Também se aplicam por vezes extensómetros mecânicos que consistem num sistema de alavancas com grande amplificação, tais como os extensómetros Huggenberger. No entanto, só podem usar-se em observações a curto prazo, sendo muito perturbados por variações de temperatura e vibrações.

b) *Extensómetros acústicos*

O extensómetro acústico é essencialmente constituído por um fio metálico esticado entre dois pontos, medindo-se a variação da distância destes a partir da variação da frequência própria fundamental de vibração do fio (4). Como se sabe, esta frequência é dada pela expressão

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

onde $l$ é o comprimento da corda, $\sigma$ a tensão a que está submetida e $\rho$ a massa específica do respectivo material. Quando $\sigma$ varia de $\Delta\sigma$, a variação de frequência correspondente é

$$\Delta f = \frac{1}{4l}\sqrt{\frac{1}{\rho\sigma}}\,\Delta\sigma$$

Portanto, a variação de frequência aumenta quando o comprimento da corda diminui, o mesmo se dando com a diminuição da tensão.

Nos dispositivos mais frequentemente usados o fio de aço é posto em vibração por meio de um electroíman, que depois recolhe e transmite as vibrações a um aparelho que mede a sua frequên-

cia. Em regra, esta medição é feita por comparação com a frequência de uma corda cujo comprimento se faz variar de maneira conhecida, à custa de um parafuso micrométrico de alta precisão. Contudo, já se dispõe de aparelhagem susceptível de medir directamente a frequência.

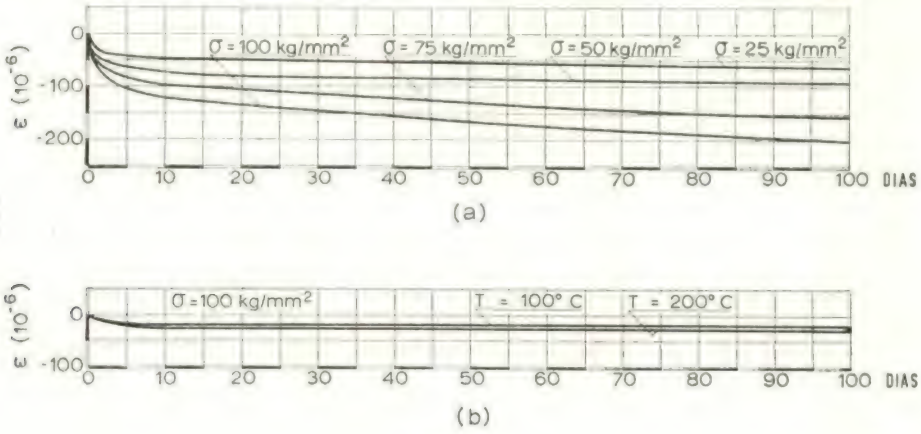



Fig. 7

Um dos problemas que se põe nos extensómetros acústicos é a eliminação da relaxação dos fios usados, a qual pode introduzir grandes erros nas leituras. Na fig. 7 a apresenta-se a evolução no tempo das leituras de fios de aço de alta resisiência (tensão de rotura 250 kg/mm²), com diâmetro de 0,3 mm, esticados sob a acção das tensões iniciais indicadas, verificando-se que, mesmo após um

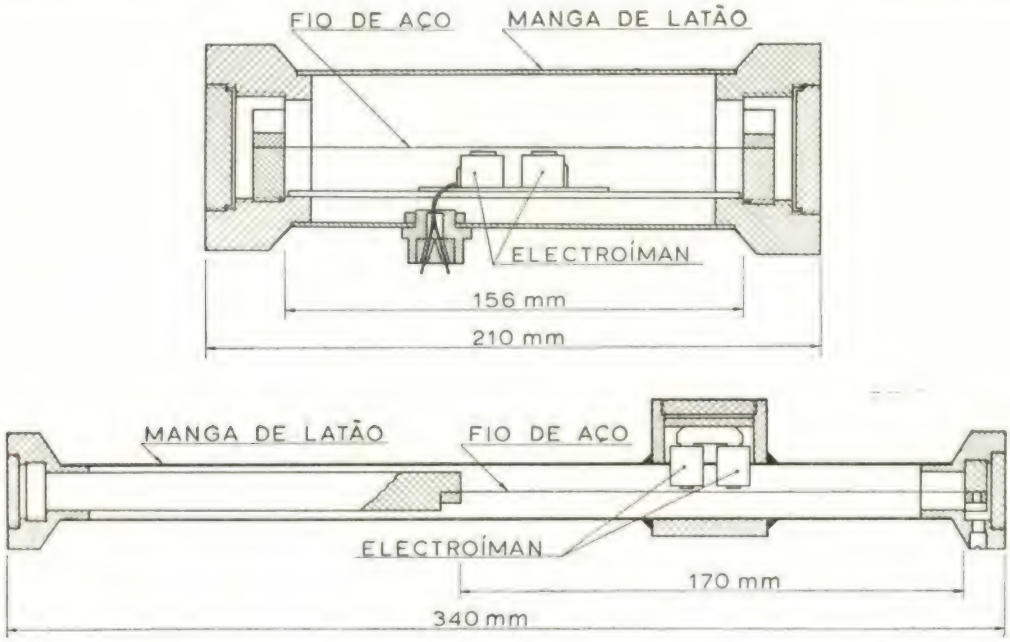



Fig. 8

mês da aplicação da tensão, ainda a relaxação introduz grandes variações nas leituras. Mostram-se também (fig. 7 b) os resultados obtidos com fios esticados sob uma tensão de cerca de 100 kg/mm² e submetidos a tratamento térmico a 100° e 200° C. Aplicada uma tensão de 100 kg/mm² após o tratamento, verifica-se que a relaxação é desprezável a partir de dez dias.

Na fig. 8 apresentam-se secções longitudinais de extensómetros acústicos usados em medições no interior de estruturas de betão. A corda e o electroíman são protegidos por uma manga de aço

Fig. 9

que liga as cabeças onde são fixados os extremos da corda. O extensómetro com menor secção emprega-se sobretudo na observação de peças de betão armado, nas quais frequentemente se luta com falta de espaço para a colocação de aparelhos. Neste mesmo extensómetro a corda tem apenas um comprimento igual a metade da base de medida do aparelho a fim de se obter maior sensibilidade. Na fig 9 vê-se um extensómetro acústico entre as armaduras de uma peça antes da betonagem e na fig. 10 um outro integrado numa armadura de uma estrutura de betão armado.

Os extensómetros acústicos também podem ser usados em medições na superfície desde que as variações de temperatura sejam pequenas. Mesmo neste caso é necessário, em regra, proteger tèrmicamente o extensómetro. Na fig. 11 vê-se um extensómetro acústico concebido para medições na superfície, a curto prazo, e que, à custa de alongas, pode ser usado sobre bases com diversos comprimentos.

As características fundamentais dos extensómetros acústicos são a sua fidelidade a longo prazo, grande precisão e possibilidade de medição a distância, o que os torna adequados para utilização nas mais variadas condições, quer em estruturas de betão armado (5), quer em barragens de betão (6), quer em estruturas metálicas (7), quer em maciços rochosos (8) (9), etc. Quanto à observação a distância deve notar-se que, contràriamente a outros tipos de extensómetros, as leituras dos extensómetros acústicos não são influenciadas pelas características dos cabos de ligação pois a grandeza observada é uma frequência.

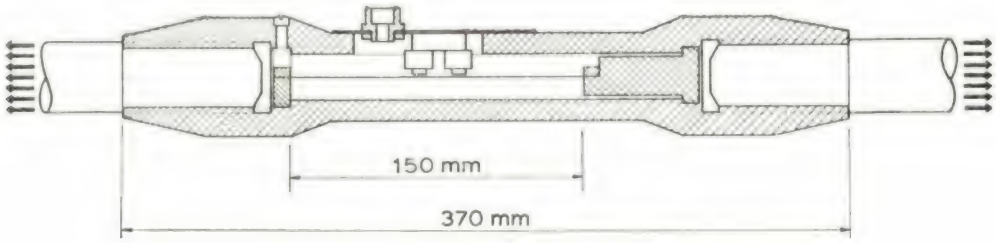



Fig 10

Os extensómetros acústicos estão especialmente indicados para a observação de estruturas de betão, tanto a curto como a longo prazo. De facto, as deformações a medir são em geral muito pequenas, requerendo extensómetros de grande precisão e, como já foi referido, é aconselhável habitualmente fazer observações em pontos do interior para as quais esses extensómetros são muito adequados.

Os extensómetros com uma base de medida de cerca de 20 cm, que são comuns, permitem geralmente alcançar precisões de cerca de $5 \times 10^{-6}$ na medição de deformações. Esta precisão pode

# MAGUE

Guindaste eléctrico de 50t/16m - 25t/30m, em serviço nas obras de melhoramento do Porto da Póvoa de Varzim

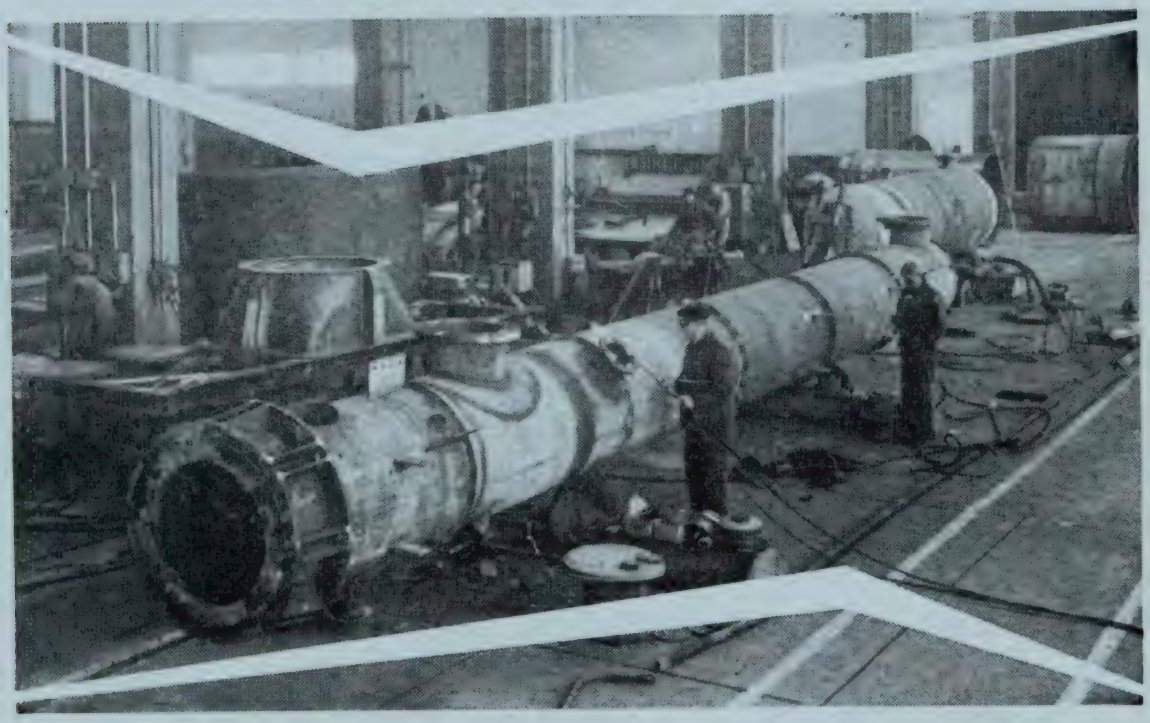
PONTES ROLANTES ——— *Projecto e fabrico*
GUINDASTES ——— *Projecto e fabrico*
APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS — *Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS ——— *Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey*
TURBINAS A VAPOR ——— *Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie*
EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L.

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

# aços vazados
# ferros meehanite
# mecânica MÉDIA E PESADA
# construções metálicas

COMPORTAS
TURBINAS
CONDUTAS FORÇADAS
RESERVATÓRIOS SOB PRESSÃO
PERMUTADORES DE CALOR



**Indústria dos Petróleos.**

**Coluna de 1.000 mm ø × 10 000 mm, em fase final de fabrico.**

DIVISÃO METALO-MECÂNICA
COMPANHIA UNIÃO FABRIL

AVENIDA 24 DE JULHO, 170 — LISBOA 2 ✦ TELEFONES 67 04 21 E 67 20 61 ✦ TELEGRAMAS: METALOFABRIL

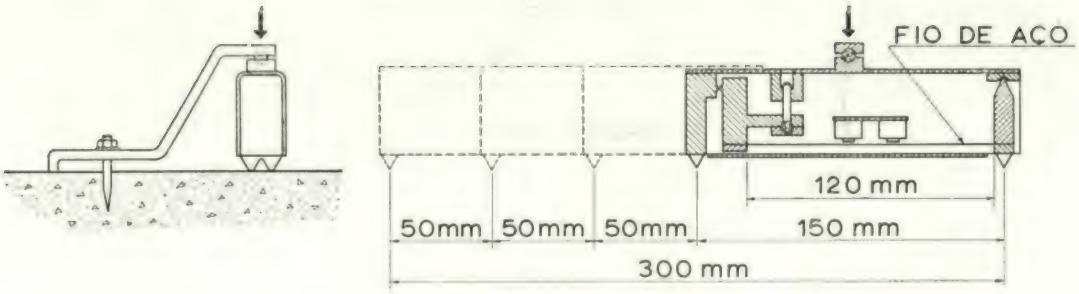



Fig. 11

ser aumentada pela redução do comprimento do fio ou pela transmissão da deformação da base a uma corda mais curta.

c) *Extensómetros eléctricos de resistência*

Pode dizer-se com segurança que, nos últimos 20 anos, o progresso mais importante no domínio da medição de deformações, tanto em laboratório como «in situ», foi o desenvolvimento dos bem conhecidos extensómetros eléctricos de resistência. As dimensões muito reduzidas, a elevada precisão e a possibilidade de serem usados pràticamente com qualquer comprimento, para observações a distância e para medições estáticas e dinâmicas, permitem o seu emprego nas mais variadas circunstâncias.

Contudo, a sua utilização na observação das estruturas encontra duas fortes limitações. Uma provém da sua grande sensibilidade à humidade, de tal modo que em materiais ou ambientes húmidos, que são comuns, só podem ser usados recorrendo a protecções especiais, o que aconselha, em regra, a utilização de extensómetros de outros tipos. A outra limitação diz respeito às observações a longo prazo, não só em virtude da sensibilidade à humidade mas também à fluência dos materiais plásticos do extensómetro e das colas usadas na sua ligação.

Fig. 12

Quanto a medições na superfície, os extensómetros eléctricos colados adequam-se bem à observação de estruturas metálicas (fig. 12), sendo aconselhável, mesmo em observações que durem poucos dias e em condições de humidade favoráveis, tomar precauções para a sua protecção contra a humidade.

Também estes extensómetros têm sido usados para a medição de deformações na superfície de estruturas de betão armado, mas nesse caso é necessário adoptar técnicas especiais para os proteger contra a humidade (10). Dadas as suas reduzidas dimensões, os extensómetros eléctricos estão especialmente indicados para a medição das deformações em armaduras (11).

Na medição de deformações no interior, os extensómetros eléctricos do tipo Carlson, não colados, merecem grande confiança. Como se vê na fig. 13, são essencialmente constituídos por dois fios metálicos esticados, dispostos de maneira que, quando o aparelho se deforma, um dos fios diminui de comprimento enquanto o outro sofre um alongamento com a mesma grandeza. Deste modo, quando os dois fios estão ligados em série e são aplicados num braço duma ponte de Wheatstone,

a variação da sua resistência eléctrica entre duas épocas depende apenas da correspondente variação de temperatura, que pode assim ser medida. Quando os dois fios são aplicados em dois braços da ponte, o cociente da variação das suas resistências eléctricas depende ùnicamente da deformação do aparelho.

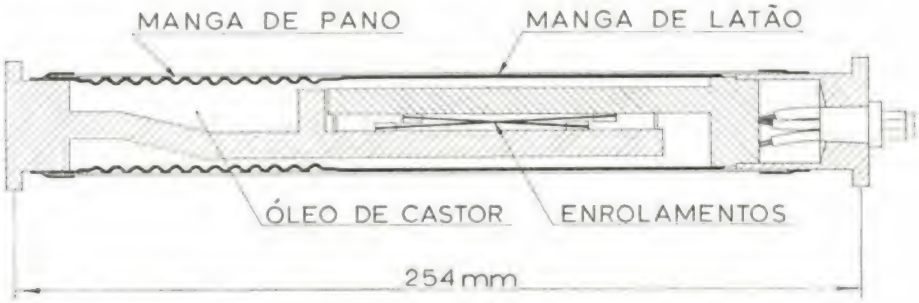



Fig. 13

Segundo a nossa experiência, os extensómetros Carlson são muito fiéis para observações a longo prazo e têm elevada precisão. Para merecerem inteira confiança é necessário isolar os cabos de ligação aos locais de medida, o que não é difícil hoje em dia. A precisão obtida normalmente na medição de deformações é da ordem de $5 \times 10^{-6}$, o que equivale aproximadamente à dos extensómetros acústicos. A precisão das medições de temperatura é de cerca de 0,1°C.

Os extensómetros Carlson têm sido largamente usados nos E. U. A. (12) e mais recentemente na Europa (9), principalmente na observação de barragens de betão. Na fig. 14 vê-se um grupo de 9 extensómetros desse tipo para a determinação do estado de tensão triaxial num ponto do interior de uma barragem.

Fig. 14

d) *Extensómetros de indução*

Mencionamos ainda os extensómetros de indução, os quais apesar de serem pouco utilizados apresentam perspectivas de interesse muito promissoras (13).

O extensómetro de indução (fig. 15) é essencialmente constituído por uma bobina com um núcleo ferromagnético, variando a indutância da bobina quer com a deslocação de parte do circuito magnético — tipo de entreferro variável (fig. 15a) — quer com a deslocação do núcleo em relação à bobina — tipo de posição de núcleo variável (fig. 15b) — quer com a modificação das propriedades magnéticas do núcleo devido a tensões aplicadas — tipo de magnetostrição (fig. 15c).

Os extensómetros de indução prestam-se às observações a distância, quer à superfície quer no interior, em regime estático ou dinâmico. Não temos conhecimento de ter sido averiguada de maneira sistemática a sua fidelidade em medições a longo prazo «in situ», mas não vemos razão para não ser satisfatória. Nas observações a curto prazo obtêm-se fàcilmente maiores precisões com eles do que com os extensómetros acústicos e de resistência.

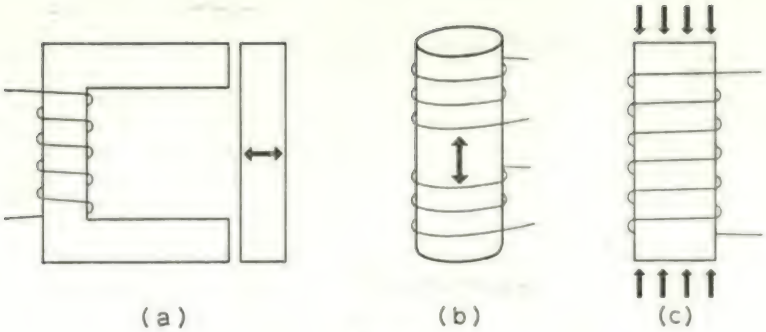



Fig. 15

e) *Extensómetros de grande base*

Na medição de deformações no domínio de engenharia civil levanta-se muitas vezes o problema, que trataremos mais adiante, da influência da estrutura grosseira de certos materiais, como os betões e as rochas. Assim, é por vezes necessário fazer medições sobre grandes bases. Na fig. 16 apresentam-se dois extensómetros com bases muito longas desenvolvidos no L.N.E.C. (9). Um deles (fig. 16 a), especialmente destinado às medições em barragens, tem uma base de medida com 60 cm e duas cordas vibrantes, aumentando o comprimento de uma delas e diminuindo o da outra à medida que o aparelho se deforma. Deste modo podem ser feitas simultâneamente duas medições, o que aumenta a precisão. O outro extensómetro, com uma base de medida de 2 m, emprega-se em maciços rochosos, sendo o seu elemento activo de medição um medidor de juntas do tipo Carlson (fig. 16 b).

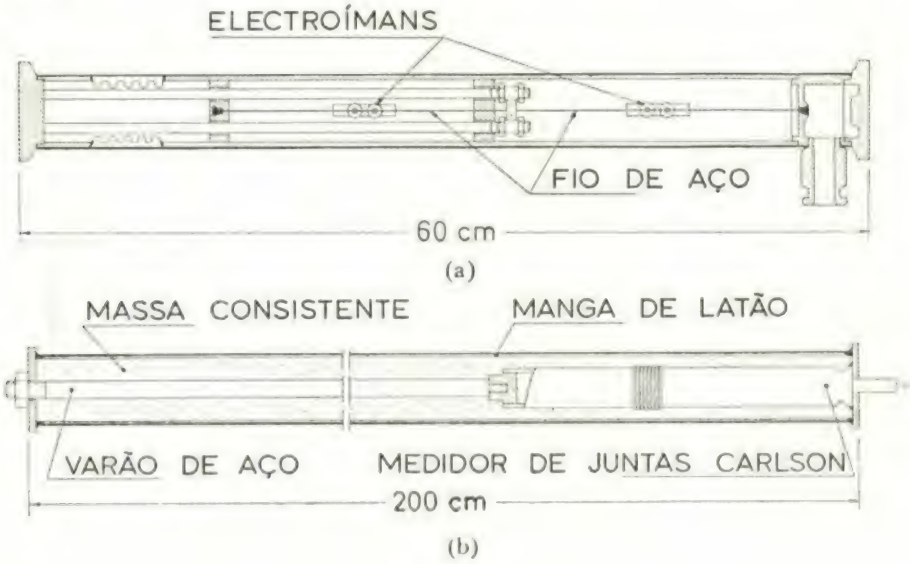



Fig. 16

Na fig. 17 apresenta-se o esquema de uma montagem usada pelo L.N.E.C. na medição de deformações de bases muito longas em galerias de barragens e nas suas fundações. Como se vê, é essencialmente constituída por uma fita de invar esticada que serve de base com um comprimento bem definido. A variação de distância entre dois pontos é determinada por leituras da fita feitas por meio de microscópios a eles ligados. Torna-se assim possível medir as variações de distância entre pontos afastados de vários metros, por exemplo 6 ou 12 m, com uma precisão de cerca de 0,05 mm o que corresponde a uma extensão de $5 \times 10^{-6}$ para comprimentos da base de 12 m, isto é, a

Fig. 17

mesma precisão obtida com os extensómetros acústicos e do tipo Carlson. Na fig. 18 apresentam-se os resultados da medição de deformações entre dois pontos distanciados de 12 m em galerias da barragem de Cabril (Portugal) e o seu confronto com os valores das deformações fornecidos por extensómetros do tipo Carlson embebidos no betão na vizinhança das galerias (9). É de salientar o notável acordo que se verifica entre resultados obtidos com técnicas tão diversas.

EXTENSÕES ($10^{-6}$)

| COTA | | 293 | | | 255 | 239 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BLOCO | | UV | JK | AB | JK | QR | DE |
| ENTRE AS ÉPOCAS 1 e 2 | FITA DE INVAR | +78 | +94 | +68 | -32 | -25 | -3 |
| | EXTENSÓMETRO | +81 | +106 | +84 | -24 | -25 | +1 |
| ENTRE AS ÉPOCAS 1 e 3 | FITA DE INVAR | -48 | -81 | -50 | -197 | -110 | -87 |
| | EXTENSÓMETRO | -61 | -87 | -51 | -146 | -106 | -73 |

| ÉPOCA | DATA | NÍVEL DA ALBUFEIRA |
|---|---|---|
| 1 | 30-I-61 | VAZIA |
| 2 | 25-V-61 | 268,5 |
| 3 | 11-I-62 | 293,4 |

Fig. 18

## 4 — DIMENSÃO, FORMA E RIGIDEZ DOS EXTENSÓMETROS

Ao definir as características do extensómetro a usar numa medição «in situ», uma das primeiras questões que se põe é a do comprimento da base de medida a adoptar. Seja AB = L o comprimento da base de medida e $\delta$ a deformação que ela sofre. Como as deformações são medidas com vista ao cálculo das tensões a partir das extensões $\varepsilon = \frac{\delta}{L}$, em primeiro lugar é necessário que o campo das extensões possa ser considerado constante ou variando linearmente ao longo de AB, e em segundo lugar que AB = L seja suficientemente grande em face das dimensões dos elementos da estrutura do material em consideração, isto é, dos agregados no caso do betão, de cristais no caso de metais, etc.

Na fig. 19 apresenta-se uma curva típica de variação de $\varepsilon = \frac{\delta}{L}$ em função de L. Para valores de L superiores a um certo limite $L_1$ o valor de $\varepsilon$ variará com L, crescendo ou decrescendo conforme a variação do campo das extensões ao longo de L; num certo intervalo $L_1$ $L_2$ $\varepsilon$ poderá ser considerado constante em face da precisão da medição das deformações; finalmente, abaixo de $L_2$ começará a fazer-se sentir a influência da estrutura do material, a qual pode introduzir rápidas variações no valor de $\varepsilon$. O fenómeno pode repetir-se, por exemplo no caso de um betão a curva de variação

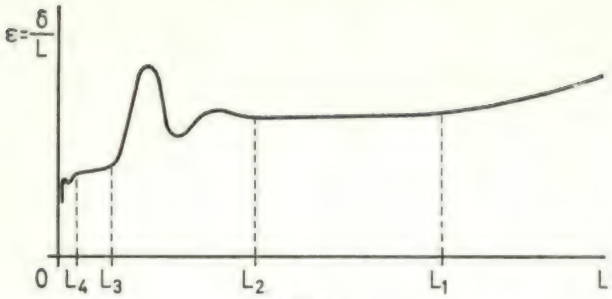


Fig. 19

pode apresentar um patamar $L_3$ $L_4$ correspondente à medição de $\delta$ no interior de um elemento do agregado. Quando se fazem medições de deformações «in situ» o valor de L deve situar-se no intervalo $L_1$ $L_2$, pois não se deseja analisar a influência da estrutura do material mas sim o comportamento da obra, suposto o material como um meio contínuo, hipótese esta implícita em todas as teorias de cálculo de estruturas.

Nas medições de deformações em obras de engenharia civil, nas quais não há a considerar, em regra, campos de tensão com fortes gradientes, os comprimentos das bases dos extensómetros usuais são inferiores em geral ao limite superior $L_1$. Sòmente no caso de estruturas metálicas é necessário observar por vezes concentrações de tensões que obrigam a limitar o comprimento da base. O problema que se põe com frequência na medição de deformações «in situ» é, pelo contrário, o de respeitar o limite inferior $L_2$. Assim, no caso do betão, é prática corrente exigir que $L_2$ seja superior a 4 a 5 vezes a maior dimensão dos agregados. A melhor confirmação que temos tido da justeza deste critério é o facto de, quando ele é respeitado, se verificarem satisfatòriamente as condições de compatibilidade das deformações medidas no mesmo ponto segundo diversas direcções. No caso das barragens, como as bases dos extensómetros não excedem em regra 20 a 30 cm, é-se obrigado a eliminar normalmente os elementos dos agregados de dimensão superior a cerca de 5 cm. Os extensómetros da fig. 16 a, que podem ser aplicados até uma dimensão máxima do agregado de 15 cm, começaram a ser utilizados no L.N.E.C. para investigar a influência da remoção dos elementos dos agregados com mais de 5 cm. No caso dos maciços rochosos, dada a sua estrutura e heterogeneidade, é aconselhável usar extensómetros ainda com maiores bases, a fim de se obter resultados significativos (fig. 16 b).

Quando a medição de deformações é feita em pontos do interior, deverá merecer particular atenção a forma e a rigidez do extensómetro de modo a não ser perturbado o valor das deformações a medir. Consideremos um extensómetro com a habitual forma cilíndrica instalado num campo de tensões $\sigma$ (fig. 20). Seja $\delta = \frac{\sigma}{E} H$ a deformação sofrida por um comprimento H antes da instalação do extensómetro e $\delta_1 = \frac{\delta}{\alpha}$ a deformação deste, isto é, a variação da distância entre as suas bases. Estudos levados a cabo recentemente no L.N.E.C. sobre a influência de uma cavidade cilíndrica num sólido elástico forneceram as curvas indicadas na figura. Uma das curvas refere-se a $\delta_1$ medido entre os centros das bases do extensómetro e a outra à suposição de que as bases são rígidas. Como se vê, mesmo para um valor $\frac{H}{D} = 10$, que corresponde aos extensómetros mais esbeltos usados correntemente, a correcção $\alpha$ atinge cerca de 0,85, isto é, a cavidade aumenta a deformação de cerca de 15 %. Conclui-se pois, o que tem grande interesse prático, que o valor da variação da distância entre as bases do extensómetro não fornece o valor real da deformação a medir e portanto deverá ser corrigido. Além disso, como as bases dos extensómetros em geral são bastante espessas e o comprimento da base de medida por vezes não é bem definido, não

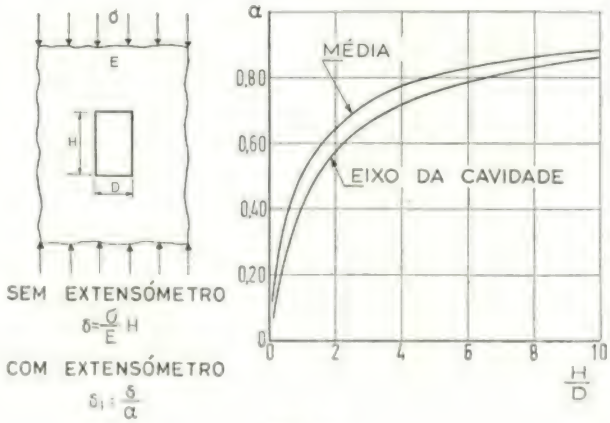


Fig. 20

pode ser dispensada uma aferição empírica para cada tipo de extensómetro. Esta aferição consiste na comparação das leituras do extensómetro colocado num prisma do material da estrutura com as deformações indicadas por extensómetros colocados à superfície do prisma. Uma vez que se proceda à aferição dos extensómetros, $\frac{H}{D}$ poderá, em princípio, ter qualquer valor. No entanto, como D deverá ser pequeno em relação à espessura dos elementos a observar, o espaço necessário à instalação dos elementos de medição do extensómetro leva a escolher os extensómetros longos. Quando D não for suficientemente pequeno, deverão aferir-se os extensómetros em peças que reproduzam as condições em que vão ser utilizados.

A outra questão a considerar na medição de deformações em pontos do interior é a da influência da rigidez do extensómetro, o qual iremos assimilar a um cilindro de material com um módulo de elasticidade $E_1$ (fig. 21). Continuaremos a designar por $\delta$ a deformação de uma base H antes da introdução do extensómetro e designaremos agora por $\delta_2 = \delta/\beta$ a deformação que sofre o aparelho com uma rigidez definida a partir de $E_1$. Na fig. 21 apresenta-se a família de curvas de parâmetro $\frac{H}{D}$, calculadas recentemente no L.N.E.C., as quais fornecem o valor de $\beta$ em função da relação $E_1/E$ dos módulos de elasticidade do extensómetro e do material onde ele está instalado, quando $E_1$ varia desde 0, isto é, extensómetro sem rigidez, até E, ou seja extensómetro com a mesma deformabilidade do material da estrutura. Supôs-se nos cálculos realizados que a superfície lateral do extensómetro estava desligada do material da estrutura e que as suas bases eram rígidas. Como era de esperar, para $E_1/E = 1$ é $\beta = 1$, e $\beta$ decresce quando $E_1/E$ decresce, decrescendo tanto mais quanto menor é H/D. Para $H/D = \infty$ é $\beta = 1$, devendo notar-se contudo que para os extensómetros esbeltos correntes, com $H/D = 10$, a correcção $\beta$ ainda é importante, exceptuada a vizinhança de $E_1/E = 1$. Conclui-se pois que, para os extensómetros correntes, para os quais $E_1/E$ é bastante inferior à unidade, é necessário sempre ter em consideração a sua rigidez, o que constitui outro motivo para a sua aferição.

Um problema que se põe é o da rigidez mais conveniente a dar a um extensómetro de modo a melhorar a precisão da determinação das deformações $\delta$ e, portanto, das tensões $\sigma$. Se o módulo de elasticidade do material da estrutura tivesse um valor bem definido, então o erro a considerar para as deformações $\delta = \beta \cdot \delta_2$ e para as tensões $\sigma = E \cdot \beta \delta_2/L$ seria o resultante da medição de $\delta_2$ e, portanto, o aumento da rigidez do extensómetro reduziria, em geral, a precisão, pois diminuia o valor da grandeza a medir, $\delta_2$. Porém o módulo de elasticidade dos materiais em cujo interior se fazem medições, como o betão e os solos, varia muito de ponto para ponto. Deste modo, há a contar não só com a influência do erro de medição de $\delta_2$, mas também do que provém de $\beta$ pelo facto de a aferição ser feita para um dado valor de E (supõe-se $E_1$ constante), que pode ser diferente do módulo de elasticidade no ponto em observação. Ora para o caso limite de extensómetro sem rigidez, $E_1/E = 0$, o valor da constante $\beta$ (que então é igual a $\alpha$) não é influenciado por E, e à medida que $E_1/E$ aumenta, cresce a influência de uma variação de E.

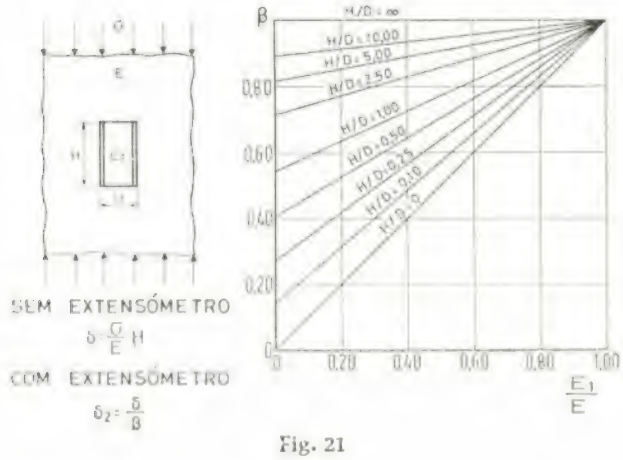


Fig. 21

Conclui-se pois que a diminuição da rigidez de um dado tipo de extensómetro aumenta a precisão da determinação das deformações $\delta$ e das tensões $\sigma$. Outras razões há porém que militam a favor da pequena rigidez dos extensómetros. Referimos em primeiro lugar que o aumento de rigidez acentua a concentração de tensões em torno do extensómetro, donde resulta que quanto mais

rígido este for para mais baixos valores das tensões a medir se ultrapassarão as deformações elásticas em torno do extensómetro, as quais provocarão a sua resposta não linear e o aparecimento do efeito tempo. A favor da baixa rigidez invoca-se ainda o facto de que quanto mais baixa for tanto maiores serão as dimensões mínimas das peças onde os extensómetros poderão ser montados sem se observar efeito das dimensões.

## 5. CORRECÇÃO A INTRODUZIR NA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES

Como as deformações são medidas para determinar tensões, deverá proceder-se à sua medição de maneira que possam ser separadas fàcilmente as deformações devidas a tensões das provenientes de outras causas. Estas causas são as variações de temperatura, as variações de humidade (no caso dos materiais porosos tais como o betão, os solos ou as rochas) e mesmo as deformações devidas à evolução do próprio material como, por exemplo, a chamada variação autogénea de volume do betão.

A medição de deformações «in situ» requer, em regra, que se tomem precauções para eliminar a influência das variações de temperatura. Um método geral que pode ser utilizado consiste na medição da temperatura no ponto onde é colocado o extensómetro, corrigindo-se a respectiva leitura por meio de um coeficiente de variação de temperatura do aparelho montado sobre o material. Este coeficiente é obtido em laboratório em peças cuja temperatura se faz variar uniformemente. A introdução da correcção é facilitada quando se usam extensómetros, como os do tipo Carlson, que também funcionam como termómetros.

No caso dos extensómetros de aço, como os acústicos, a correcção de temperatura devida à diferença dos coeficientes de dilatação térmica é desprezável na observação de estruturas metálicas e muito reduzida nas estruturas de betão, pois o coeficiente deste material varia geralmente entre 7 e 11 $\times 10^{-6}$ °C$^{-1}$, o que corresponde a correcções até 4 $\times 10^{-6}$ por grau centígrado.

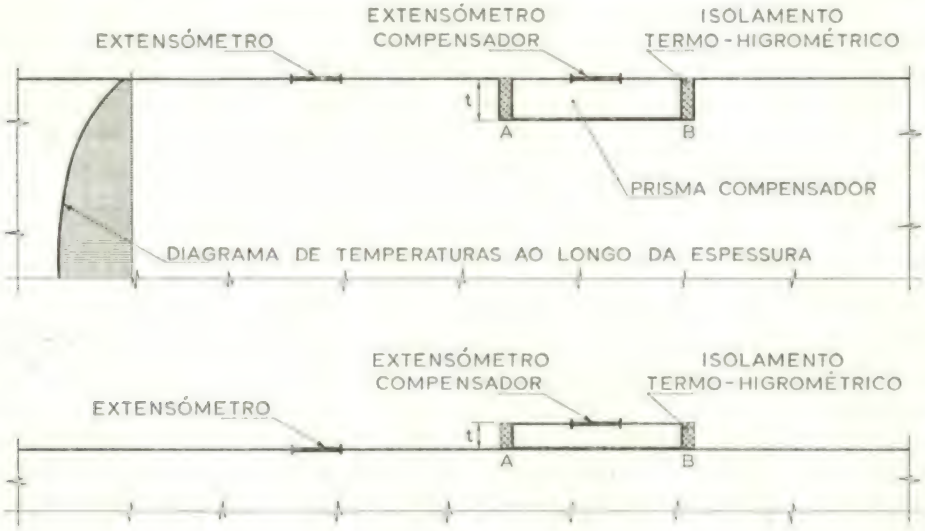



Fig. 22

Um outro método geral para obter a correcção das variações térmicas consiste em montar um extensómetro análogo, chamado extensómetro corrector, numa peça do mesmo material da estrutura, isenta de tensões e à mesma temperatura do ponto observado. A diferença entre as leituras dos dois extensómetros corresponderá às deformações devidas a tensões. A fim de garantir a igualdade das temperaturas do ponto em observação e da peça referida é necessário tomar precauções especiais. Na fig. 22 apresentam-se dispositivos possíveis para o caso de observações na superfície, nas quais é necessário garantir condições análogas de trocas de calor, por um lado com o ambiente, por condução e irradiação, e por outro lado com o próprio material da estrutura, pois nas medições

«in situ» as estruturas não se encontram normalmente em equilíbrio térmico com o ambiente. A peça onde se monta o extensómetro corrector deve poder deformar-se livremente, mas o seu contacto com a estrutura ao longo de AB (fig 22) deve ser tal que esteja assegurada a continuidade térmica; a espessura *t* deve ser suficientemente pequena de modo que o corrector possa ser considerado a temperatura constante e igual à da superfície. O dispositivo apresentado na parte inferior da figura adequa-se melhor à observação das estruturas metálicas, podendo ser usado também para estruturas de betão, tal como o anterior.

No caso de medição de deformações em pontos do interior, o extensómetro corrector terá que ser montado dentro de uma caixa de paredes duplas, posta durante a betonagem no ponto a observar (fig. 23), ou ser colocado em condições análogas de forma que se possa deformar livremente a peça que o contém. No entanto, dadas as dimensões exigidas por essa peça, a técnica de correcção que se está considerando só pode ser aplicada a obras com espessuras importantes, como as barragens (fig. 24). Em estruturas de betão armado encontra-se a dificuldade, muitas vezes insuperàvel, de dispor de espaço entre as armaduras.

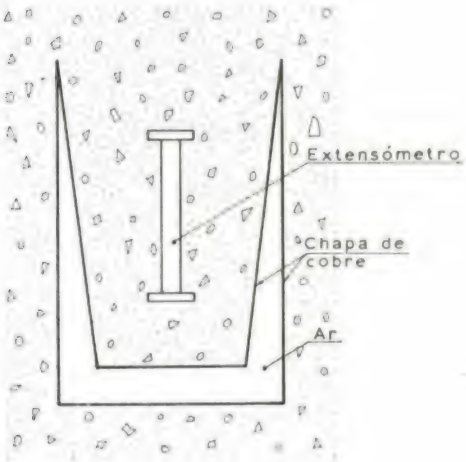



Fig. 23

Fig. 24

Quando se trata de materiais porosos, em especial o betão, as deformações devidas a variações de humidade podem atingir valores consideráveis nas observações a longo prazo. Nas observações a curto prazo de estruturas de betão, que durem digamos uns dias, esta correcção não terá que ser levada em conta geralmente.

Em princípio, poderá fazer-se a correcção dos efeitos da variação de humidade procedendo do mesmo modo que para a temperatura, isto é, medindo a humidade na vizinhança do extensómetro e aplicando a correcção determinada em ensaios de retracção em laboratório. No entanto, como não se dispõe de técnicas satisfatórias para medir a humidade, é necessário recorrer aos extensómetros correctores que podem ser os usados para as correcções de temperatura se a sua humidade reproduz a existente no ponto em observação. Assim, no caso das medições na superfície de corpos porosos (fig. 22), o contacto ao longo da superfície AB deve ser tal que não sejam perturbadas as trocas de humidade.

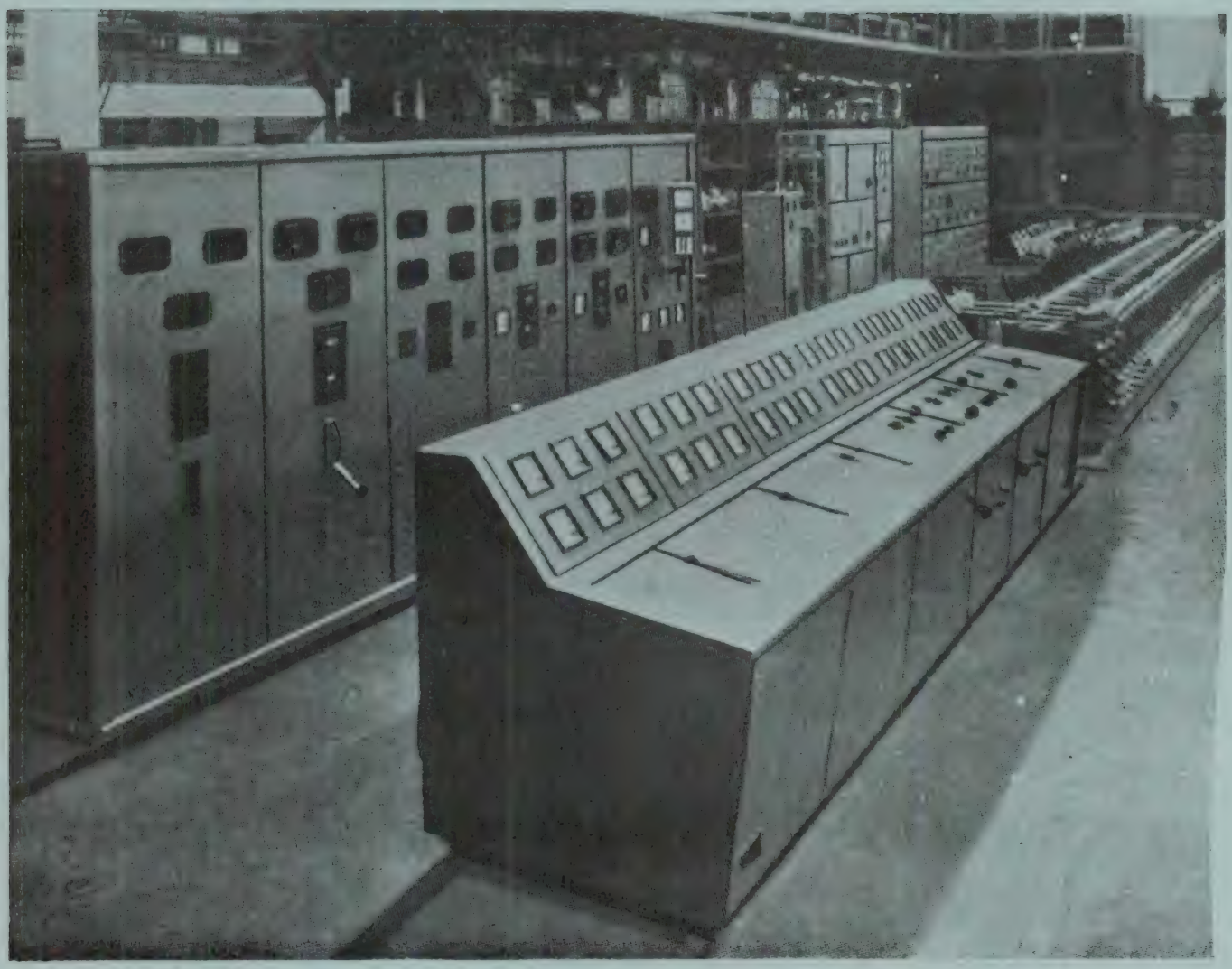
Portanto os extensómetros correctores podem permitir eliminar qualquer deformação além da devida a tensões instaladas no ponto. Na fig. 25 apresentam-se os resultados obtidos com cinco extensómetros Carlson colocados em diversas direcções num ponto do interior de uma barragem de betão. Como se vê, apesar de se tratar de um ponto a 1 m da superfície de jusante da barragem, as correcções a introduzir são importantes.

Quando as extensões indicadas pelos correctores, montados como se referiu, são relacionadas com as temperaturas não se obtém em geral uma recta, como mostra a fig. 26 a qual diz respeito a

# JAYME DA COSTA, L^DA

**MECÂNICA E ELECTRICIDADE EM TODAS AS APLICAÇÕES**

| PORTO | LISBOA | LUANDA |
|---|---|---|
| Praça da Batalha, 12 | Rua dos Correeiros, 14 | Cx. Postal 5174 |
| Telef. 2 28 12 (PPC) | Telef. 32 70 35 (PPC) | Telef. 4743 |



**Material fabricado nas nossas oficinas, pronto para expedição**

- Fabricação de aparelhagem eléctrica de alta e baixa tensão
- Equipamentos electromecânicos completos para centrais e fábricas
- Postos de transformação tipo monobloco
- Quadros blindados, capsulados e em armário
- Armaduras de iluminação de todos os tipos
- Contadores eléctricos e instrumentos de medida
- Telemedida e telecomando
- Instalações elevatórias de água
- Instalações de saneamento e esgotos
- Ferramentas de corte
- Motores Diesel industriais e marítimos
- Fogões eléctricos
- Frigoríficos
- Ventilação e condicionamento de ar
- Aparelhagem de Raios X e electromedicina

# DESPOEIRAGEM

FILTROS TECIDOS EM PEÇAS, PANOS, SACOS, MANGAS

**DE QUALQUER FIBRA NATURAL OU SINTÉTICA**

**FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS**
SOCIEDADE LIMITADA

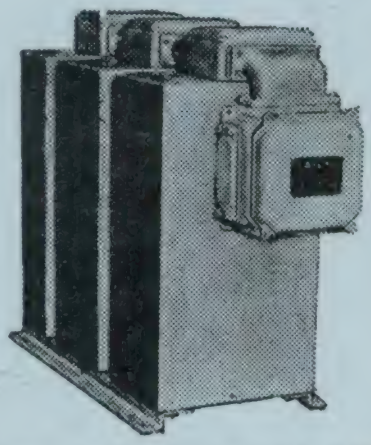
APART.: 9
TELEF.: 52093–52094
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

CONDENSADORES **ASEA**

PARA MELHORAMENTO DO FACTOR DE POTÊNCIA



Bateria de condensadores tipo CLB, 32 kVAr

- SE PAGA POR CONSUMO DE ENERGIA REACTIVA...
- SE A SUA INSTALAÇÃO ELÉCTRICA ESTÁ SOBRECARREGADA...

***...consulte:***

**ASEA ELÉCTRICA L.DA**

SEDE EM LISBOA
R. DE ARTILHARIA UM, 104, 4.º-D.º
Telefone P.P.C. — 68 90 17/8/9

END. TELEG.
ASEAPORT

FILIAL NO PORTO
R. DO CAMPO ALEGRE, 144
Telefone P.P.C. — 6 21 06/7

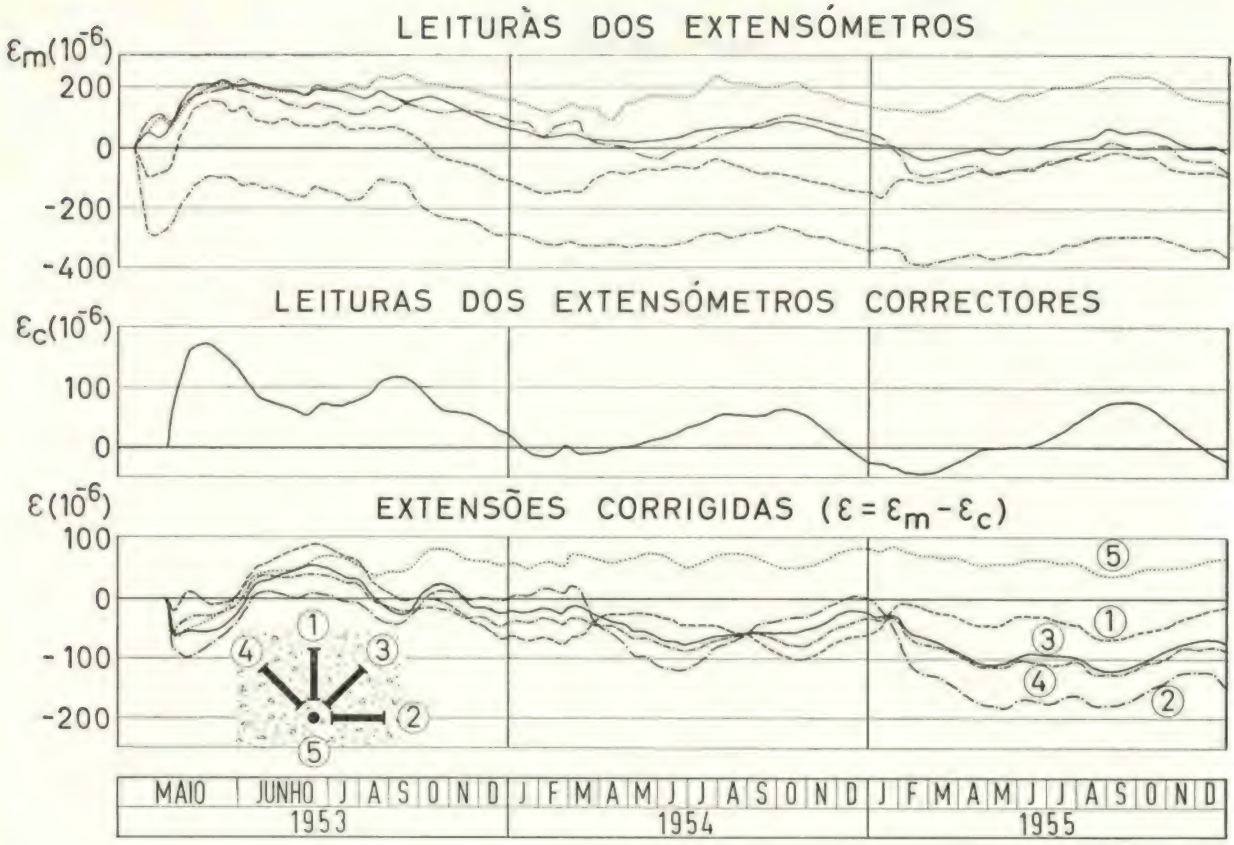



Fig. 25

leituras num extensómetro durante cerca de 1 ano. Ocorrem pois variações de volume devidas à retracção e a eventualmente outras causas, mesmo em pontos bastante afastados da superfície. Por esta razão preferimos usar, sempre que possível, este sistema de correcção a considerar sòmente a correcção obtida a partir da medição da variação de temperatura.

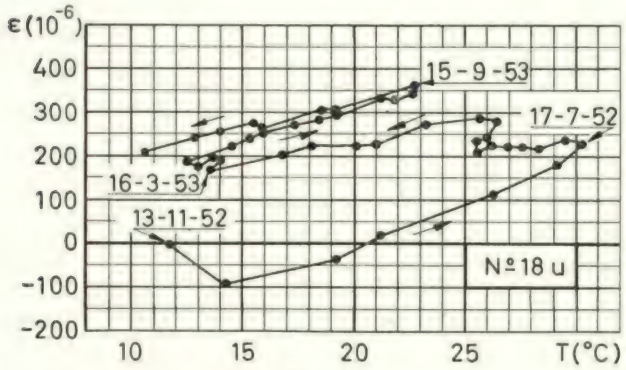



Fig. 26

No caso das estruturas de betão ou betão armado com as espessuras habituais, o problema da correcção das variações de humidade não foi ainda resolvido de forma satisfatória. A solução mais promissora consiste no desenvolvimento de técnicas satisfatórias para a determinação da humidade em pontos no interior do betão.

Muitas vezes o problema da correcção dos efeitos dos gradiantes térmicos e de humidade põe-se de maneira diferente. Assim suponhamos, em primeiro lugar, o caso de uma peça de betão em forma de caixão com a secção indicada na fig. 27, cujas paredes apresentam, como é habitual, um regime variável de temperatura ao longo da espessura, representado pela curva ABC. Na prática projecta-se considerando um gradiante constante de temperatura DE, isto é, desprezando o que por vezes se designa por efeito pele. Deste modo, se se colocarem extensómetros correctores em peças com espessura igual à da parede (fig. 27), obter-se-ão extensões corrigidas correspondentes às tensões instaladas na secção transversal devidas a forças aplica-

das à estrutura e a uma variação de temperatura ao longo da espessura dada pelo diagrama DE, estàticamente equivalente ao diagrama real ABC, uma vez que a peça com o extensómetro corrector se pode deformar livremente. O corrector introduz também uma correcção de tipo análogo no que se refere às variações de volume devidas aos gradiantes de humidade. Nalguns casos, porém, é inconveniente a montagem de tais correctores, dado que obrigam a reduzir a secção resistente das peças e outras vezes a interromper armaduras.

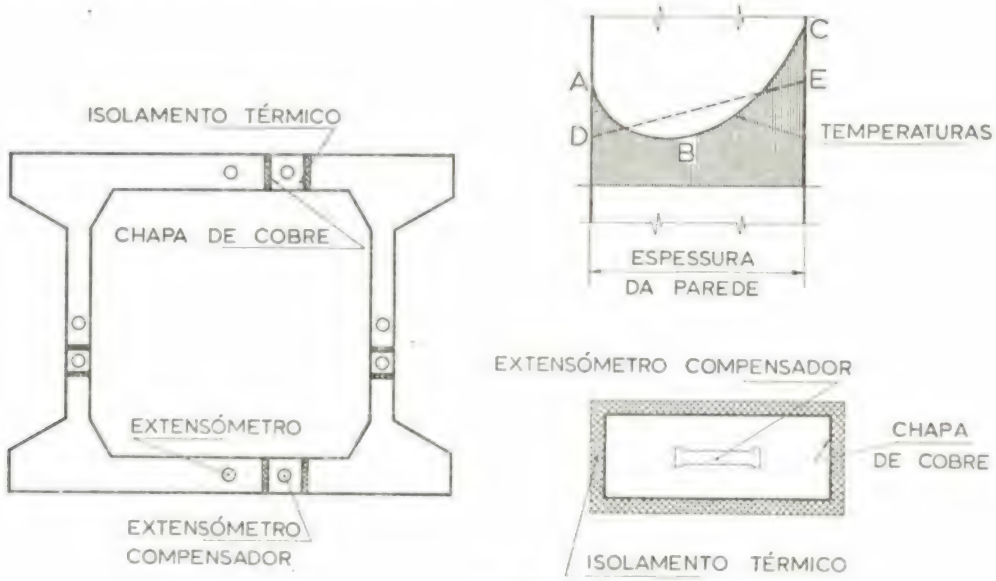



Fig. 27

Como é óbvio, o tipo de corrector que acaba de ser referido também pode ser usado em estruturas metálicas.

No caso de peças lineares, metálicas ou de betão, pode introduzir-se na medição das deformações uma correcção de tipo análogo montando extensómetros correctores em peças do mesmo material, com as mesmas secções e condições de exposição de modo a produzir-lhes precisamente as mesmas variações de temperatura e de humidade.

## 6. CÁLCULO DE TENSÕES

Uma vez determinadas as extensões devidas a tensões, põe-se o problema do cálculo destas.

No caso das estruturas metálicas, nas quais as tensões são geralmente elásticas, o seu cálculo pode fazer-se fàcilmente a partir do conhecimento do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do material.

Nas estruturas de betão e betão armado, o betão pode ser ou não considerado um material elástico, de acordo com a sua idade, o valor das tensões em causa e o tempo de aplicação das cargas. No caso da observação de deformações de estruturas durante os ensaios de carga correntes, normalmente não é necessário considerar os efeitos inelásticos, sobretudo se o betão não for muito jóvem. Pelo contrário, quando se tenham de calcular as tensões devidas à acção do peso ou de sobrecargas aplicadas muito lentamente, como é muitas vezes o caso da pressão hidrostática sobre uma barragem, então a maior parte das vezes é necessário considerar as deformações não elásticas do betão.

Segundo a nossa experiência de estudo de betões, quer de estruturas de edifícios e pontes, quer de barragens, para efeito do cálculo de tensões pode considerar-se uma lei de fluência logarítmica, do tipo

$$\varepsilon(t) = \sigma(k) \left[ \frac{1}{E(k)} + F(k) \log_e (t + 1) \right]$$

designando por

$\sigma$ (k) — tensão constante aplicada a um betão com a idade k
E (k) — módulo de elasticidade instantâneo na idade k
F (k) — parâmetro de fluência, função da idade k
t — tempo de aplicação da tensão $\sigma$ (k)
$\varepsilon$ (t) — extensão no instante t

Na determinação das propriedades do betão, quer elásticas quer de fluência, encontram-se duas dificuldades: a grande dispersão das propriedade do betão, que obriga a efectuar numerosos ensaios de peças moldadas com o mesmo betão que envolve os aparelhos, e a manutenção dessas peças em condições que reproduzam as que se verificarão na obra, especialmente no que respeita à humidade. Além disso no caso do betão de barragens é necessário eliminar muitas vezes os agregados de maiores dimensões.

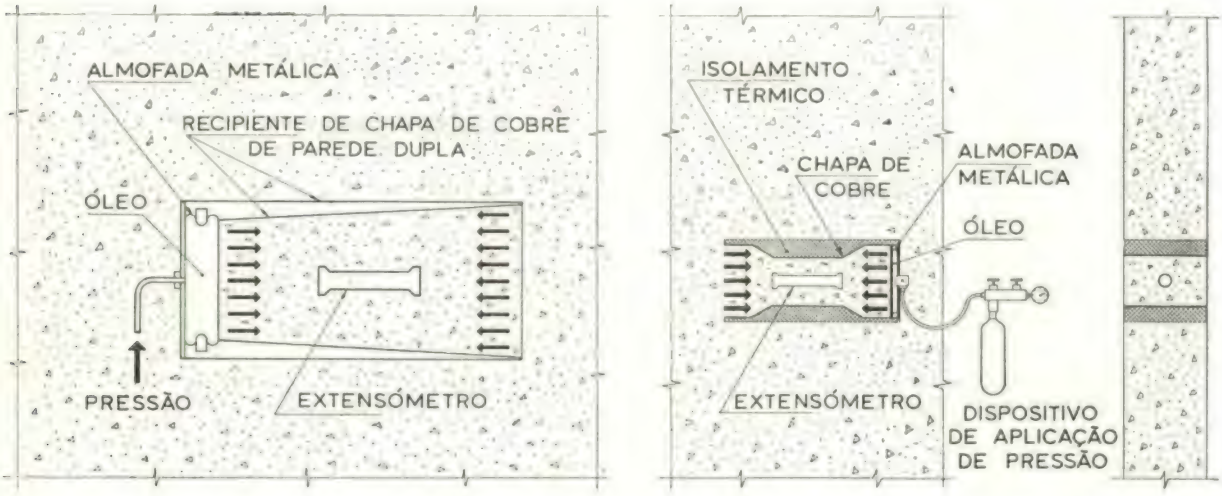


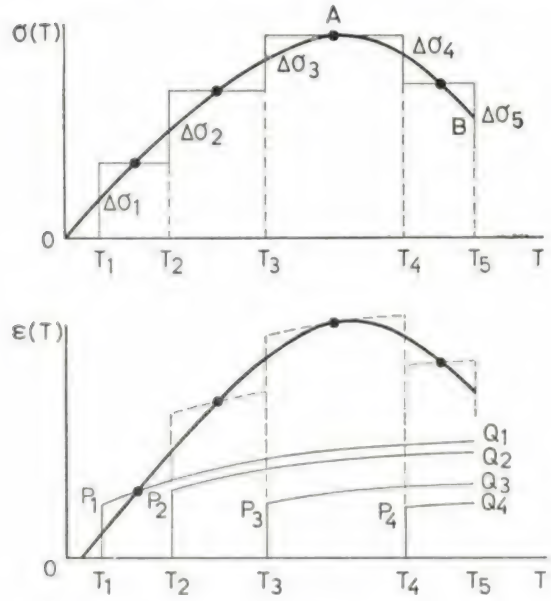

Fig. 28

Para obviar a estas dificuldades, tem muito interesse ensaiar peças prismáticas ou cilíndricas fazendo parte da estrutura, deixando nela dispositivos que permitam a aplicação de tensões (fig. 28). Vê-se à esquerda uma montagem usada em pontos do interior, em especial de barragens, e à direita uma outra adequada à observação do comportamento de peças com espessura igual à da estrutura. Com estes dispositivos podem realizar-se ensaios para determinação do módulo de elasticidade instantâneo e das deformações de fluência, para qualquer idade, em condições bem representativas. Eles permitem mesmo, no caso de solicitação uniaxial, a determinação directa das tensões, desde que se faça variar a pressão de alimentação de modo que as leituras do extensómetro incluído na peça sigam as do extensómetro em observação.

Vejamos como podem ser calculadas as tensões no caso de ser necessário considerar as deformações lentas do betão, supondo que são conhecidos os valores de E (k) e F (k) para um número suficientemente elevado de valores de k. Para isso seguimos o método desenvolvido pelo Bureau of Reclamation, baseado na aceitação do princípio da sobreposição não só das deformações elásticas, mas também das deformações devidas à fluência (14).

Considere-se um prisma submetido a uma tensão $\sigma$ (T) que varia no tempo, T, conforme a curva OAB da fig. 29. Substitua-se a curva de evolução de $\sigma$ (T) pelos incrementos sucessivos $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, ... aplicados em instantes $T_1$, $T_2$, ... Sejam $T_1$ $P_1$ $Q_1$, $T_2$ $P_2$ $Q_2$, ... as extensões que sofreria o betão quando fossem aplicadas, isoladamente, as tensões $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, ... Dado que se admite o princípio da sobreposição, o prisma submetido aos sucessivos incrementos de tensão exibirá em

cada instante T uma extensão $\varepsilon(T)$ dada pela curva a traço interrompido, obtida adicionando as ordenadas das curvas $T_1 P_1 Q_1$, $T_2 P_2 Q_2$, . . . A experiência mostra poder considerar-se, para o fim em vista, que as extensões são as mesmas em compressão e tracção e ainda que são sobreponíveis os seus efeitos, o que permitiu tratar os de $\Delta\sigma_4$ e $\Delta\sigma_5$ como os dos restantes incrementos de tensão.




$$\overline{P_1 T_1} = \frac{\Delta\sigma_1}{E(K_1)} \quad , \quad \overline{P_2 T_2} = \frac{\Delta\sigma_2}{E(K_2)} \quad , \quad ----$$

$$\varepsilon(T) = \sum_{i=1}^{T} \Delta\sigma_i \left[\frac{1}{E(K_i)} + F(K_i)\log_e(t_i + 1)\right]$$

$$(t_i = T - T_i)$$

Fig. 29

A curva de evolução das extensões $\varepsilon(T)$ obter-se-á com uma precisão que dependerá do número de incrementos de tensão considerados.

A expressão analítica de $\varepsilon(T)$ é pois:

$$\varepsilon(T) = \sum_{i=1}^{T} \Delta\sigma_i \left[\frac{1}{E(k_i)} + F(k_i)\log_e(t_i + 1)\right]$$

sendo $k_i$ a idade no instante $T_i$ e $t_i = T - T_i$, isto é, o tempo de aplicação do incremento de tensão $\Delta\sigma_i$.

Para calcular as tensões a partir do conhecimento da curva de evolução das extensões tem de se proceder de maneira inversa: considerado num instante $T_1$ um incremento de extensão $T_1 P_1$, a partir de $E(k_1)$ pode determinar-se $\Delta\sigma_1$ e traçar-se a curva de fluência $P_1 Q_1$; depois, num instante $T_2$, considerando um incremento $T_2 P_2$ da extensão, anàlogamente pode determinar-se $\Delta\sigma_2$ e traçar-se $P_2 Q_2$ que se adicionará a $P_1 Q_1$; e assim sucessivamente se obterá a curva a traço interrompido, a qual se aproxima da curva de evolução $\varepsilon(T)$. A partir dos valores de $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, . . . traça-se a curva $\sigma(T)$.

Ensaios de peças submetidas a regimes de tensões variáveis no tempo e cujas deformações são medidas, têm permitido comprovar a satisfatória aproximação do método de cálculo das tensões que acaba de ser exposto, mesmo quando se trata de peças submetidas a tracções.

No caso de terem de considerar-se equilíbrios tridimensionais, como é frequente nas barragens por exemplo, as tensões calculam-se a partir das extensões pelas conhecidas expressões do tipo

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\,\varepsilon_x + \nu\,(\varepsilon_y + \varepsilon_z)\right]$$

para o caso das deformações elásticas.

Quando se tem de considerar as deformações lentas do betão, adopta-se ainda a lei de fluência atrás considerada e admite-se que o coeficiente de Poisson se mantém constante na fluência e de valor igual ao correspondente às deformações instantâneas. Se se designar por $\varepsilon_x$, $\varepsilon_y$ e $\varepsilon_z$ as extensões medidas num dado instante segundo três direcções ortogonais, e se calcular o valor

$$\varepsilon'_x = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\,\varepsilon_x + \nu\,(\varepsilon_y + \varepsilon_z)\right]$$

as tensões são dadas por expressões do tipo

$$\sigma_x = E \,.\, \varepsilon'_x$$

sendo fácil ver que, conhecida a variação de $\varepsilon'_x$ no tempo, o cálculo de $\sigma_x$ pode fazer-se precisamente pelo caminho atrás indicado, como se se tratasse de um equilíbrio unidimensional.

Na fig. 30 apresentam-se resultados obtidos no cálculo de tensões num ponto de uma barragem onde estavam instalados 4 extensómetros [15].

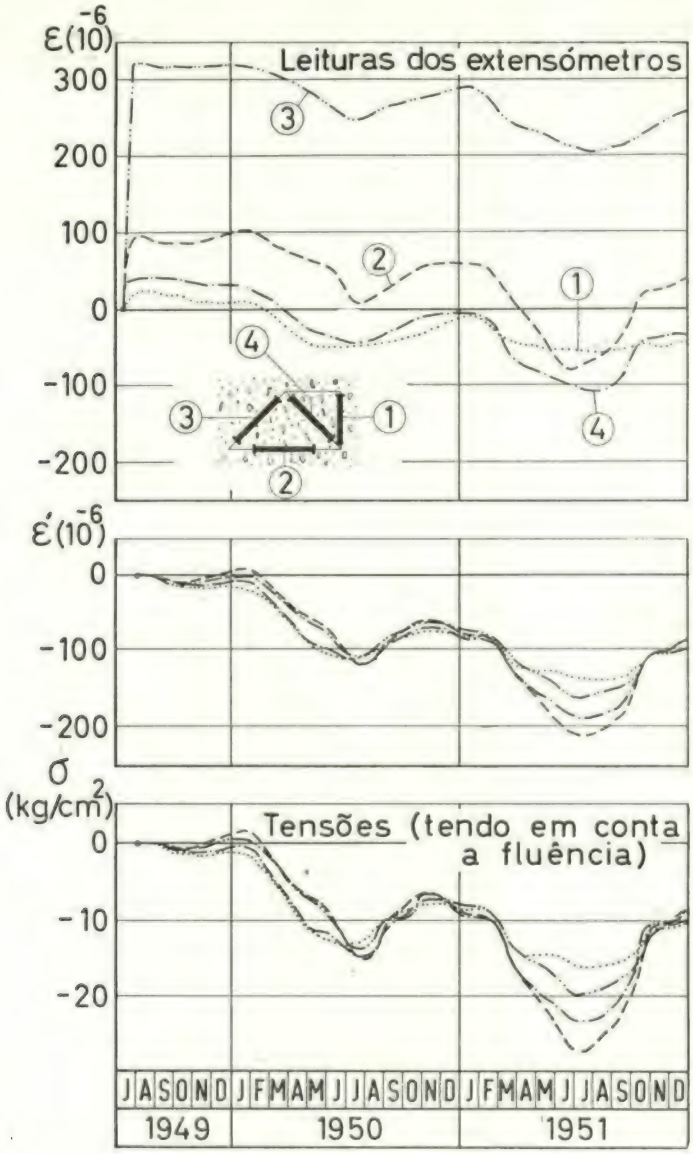



Fig 30

## 7. MEDIÇÃO DIRECTA DE TENSÕES

Como já foi frisado, a medição directa de tensões tem o maior interesse, pois nos liberta da necessidade de conhecer a relação deformações-tensões do material da estrutura. Vejamos que tipos de aparelhos podem usar-se para esse fim.

Considere-se um sólido indefinido de módulo de elasticidade E, contendo uma inclusão cilíndrica com um módulo de elasticidade $E_1$ (fig. 31), perfeitamente ajustada ao sólido nas bases e com a superfície lateral desligada. Quando se aplica ao sólido um estado de tensão $\sigma$, paralelo ao eixo da inclusão, as bases desta ficarão submetidas a um estado de tensão, em geral não uniforme, cujo valor médio designaremos por $\sigma_1$. Façamos $\sigma_1 = \frac{\sigma}{\gamma}$. Na fig. 31 apresentam-se as curvas que definem os valores de $\gamma$ em função de H/D e de $E_1/E$, calculadas para a hipótese de as bases da inclusão serem rígidas.

Verifica-se uma propriedade muito importante que oferece a possibilidade da medição directa de tensões: as curvas são assimptóticas com o eixo das abcissas, isto é, para valores de $E_1/E$ suficientemente elevados o valor de $\gamma$ pode ser considerado constante. Portanto, se for determinada por qualquer processo a tensão instalada na inclusão, a tensão no sólido é dada por $\sigma = \gamma \sigma_1$, dependendo $\gamma$ sòmente de H/D, isto é, da forma da inclusão. Quer isto dizer que, uma vez conhecido o valor da constante $\gamma$, por exemplo mediante uma aferição empírica, a inclusão comporta-se como um tensómetro, uma vez que as suas indicações só dependem da tensão instalada no sólido, sendo em especial independentes do módulo de elasticidade deste (16).

As curvas da fig. 31 mostram que quanto menor for a relação H/D tanto mais baixos são os valores de $E_1/E$ para os quais se pode supor $\gamma$ constante. Quer isto dizer que, para um dado E, poderão usar-se tensómetros com $E_1$ mais baixo, portanto menos rígidos, o que facilitará a medição da tensão $\sigma_1$ se a redução de H não trouxer por si dificuldades. Assim, sob este aspecto, o valor mais conveniente de H/D dependerá da técnica seguida para medir a tensão do próprio tensómetro.

Há, no entanto, outro aspecto a atender: quanto maior for a rigidez de um tensómetro tanto menor é $\gamma$ e portanto tanto maior é a tensão $\sigma_1$ desenvolvida no aparelho para um mesmo valor da tensão $\sigma$ a determinar. Isto é, o aumento de rigidez provoca uma concentração de tensões que se acentua ràpidamente com o aumento de H/D. Esta concentração de tensões em torno do tensómetro tem o inconveniente de tender a originar deformações não elásticas e função do tempo, as quais acarretarão a resposta não linear do aparelho e um efeito tempo.

A influência desta concentração de tensões leva a aconselhar o desenvolvimento de tensómetros de pequena espessura. Aliás, quando H tende para zero o aparelho tende para o elemento de área para o qual se dá a própria definição de tensão, desaparecendo mesmo a influência das propriedades mecânicas do material em jogo. Pelo contrário, um tensómetro alongado terá uma resposta linear sòmente enquanto for legítimo admitir que as deformações, incluidas as de fluência, são proporcionais às tensões e que é válido o princípio da sobreposição. Em contrapartida, os aparelhos desse tipo são de mais fácil realização e podem ser executados com secções transversais mais reduzidas, o que é importante quando se trata demedições em peças com espessuras relativamente pequenas.

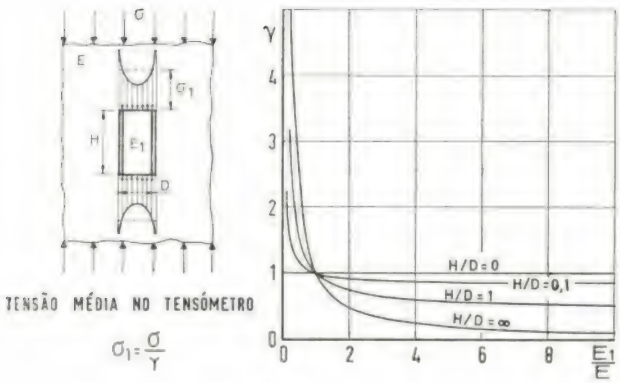



Fig. 31

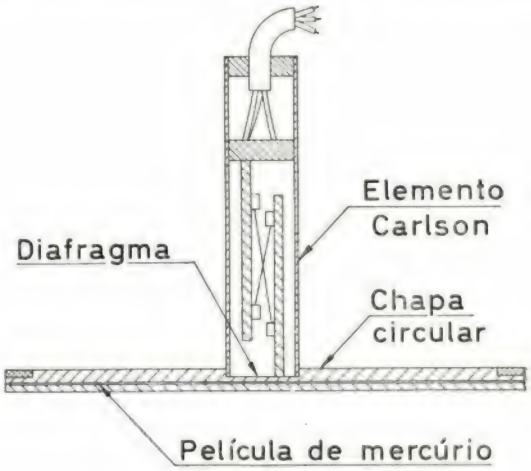



Fig. 32

O tensómetro cuja utilização está hoje mais divulgada é o do tipo Carlson (fig. 32). Tem uma relação H/D acerca de 1/20 e a determinação da tensão $\sigma$ é feita por intermédio de um extensómetro tipo Carlson, que mede os deslocamentos de um diafragma actuado pela pressão do mercúrio contido numa câmara de pequeníssima espessura. Na fig. 33 vê-se um tensómetro preparado para ser envolvido por betão. A deformabilidade deste aparelho é vizinha da do betão, isto é, $E_1/E$ é próximo da unidade e, portanto, também $\gamma$. No entanto, deve chamar-se a atenção para o facto de $\gamma$ variar muito ràpidamente (fig. 31) quando $E_1/E$ toma valores abaixo da unidade; por outras palavras,

é preferível que $E_1$ seja superior do que inferior a E. Ensaios feitos em laboratório e também o comportamento em obra mostram que as leituras dos tensómetros Carlson são muito pouco influenciadas pela fluência do betão [17], podendo esta ser desprezada, dentro da precisão que interessa em regra obter nas medições «in situ». Porém, de acordo com a nossa experiência, o funcionamento dos tensómetros Carlson é muito influenciado pelas condições de colocação, mesmo quando se tomam cuidados [9], isto é, a sua fidelidade é contestável.

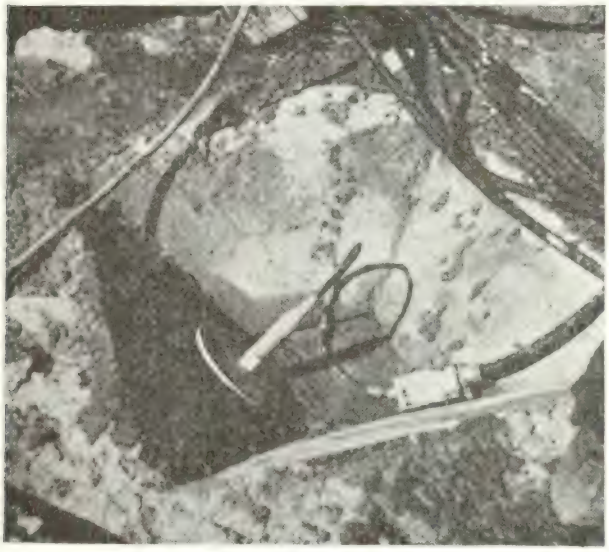


Fig. 33

Nos últimos anos têm sido usados, sobretudo em solos, os tensómetros do tipo Glötzl. Consistem essencialmente em dois discos A e B (fig. 34 b), soldados um ao outro pela periferia C, sendo a superfície interior de um deles provida de ranhuras circulares e radiais, conforme se indica.

Os discos repousam um sobre o outro, o que permite a transmissão de uma força através deles sem os flectir, e no centro de B há uma válvula D que se mantém fechada pelo disco A. Num ponto conveniente E pode introduzir-se sob pressão um fluido, como por exemplo óleo, que irá preencher todos os espaços livres entre os dois discos, subindo a pressão p no interior do tensómetro até se atingir o valor da tensão $\sigma$ que actua sobre ele (fig. 34 a). Os discos são flexíveis de modo que basta uma pequeníssima diferença entre $\sigma$ e p para determinar a abertura da válvula D e a saída do óleo, mas como este é introduzido contìnuamente por meio de uma bomba,

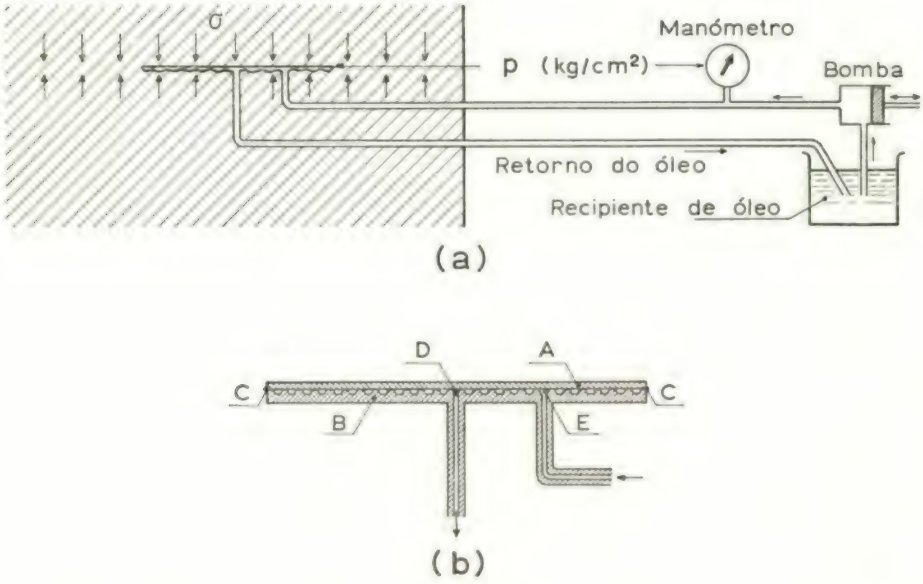



Fig. 34

a válvula ajusta-se automàticamente de forma que a pressão do óleo equilibre, em cada instante, a tensão aplicada $\sigma$. A fig. 35 mostra um tensómetro Glötzl a ser colocado num aterro.

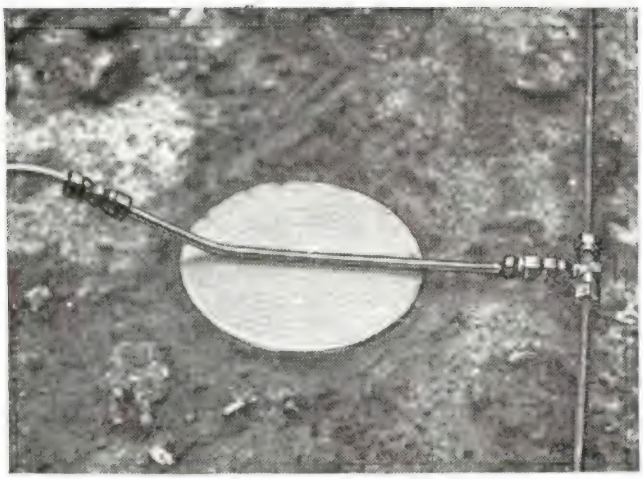


Fig. 35

O aparelho que acaba de descrever-se é de utilização menos cómoda do que o do tipo Carlson, não se adaptando a medições a grande distância. Em contrapartida, no tensómetro Carlson o cilindro que constitue o elemento de medida dificulta a sua colocação nos solos, uma vez que é difícil reproduzir uma dada condição de compactação em torno desse cilindro.

Foi desenvolvido no L.N.E.C. há alguns anos o tensómetro alongado que se vê na fig. 36. É essencialmente constituido por um cilindro de aço, de parede espessa, com uma relação H/D próxima de 3, de tal forma que o módulo de elasticidade equivalente $E_1$ é cerca de $1{,}2 \times 10^6$ kgf/cm², isto é, aproximadamente quatro vezes maior que o do betão. A fim de poder usar-se em tracção, as bases do tensómetro têm maior diâmetro que o seu corpo. As deformações do aparelho são medidas por meio de uma corda vibrante e a sua aferição é feita empìricamente, por meio de ensaios de prismas de betão, obtendo-se directamente a relação entre a tensão aplicada, $\sigma$, e a leitura da corda.

Ensaios de tensómetros instalados em prismas mostram que as deformações, e portanto as tensões $\sigma_1$, do tensómetro alongado se mantêm proporcionais à tensão $\sigma$ aplicada até valores desta bastante elevados (fig. 37) e que as leituras do

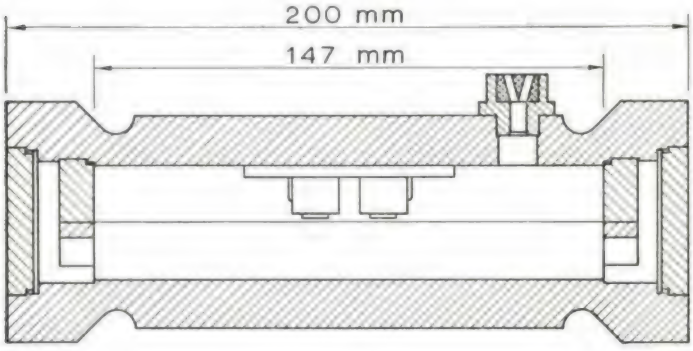



Fig 36

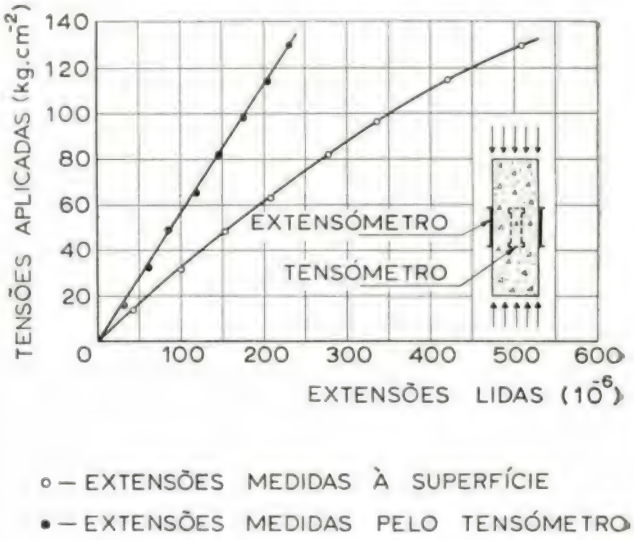



Fig. 37

aparelho são pouco influenciadas pelo módulo de elasticidade do betão. Estes ensaios evidenciaram, contudo, que na medição de tensões em estruturas de pequena espessura, digamos inferior a 30 cm, é necessário fazer a calibração do tensómetro em prismas que reproduzam as dimensões da estrutura. À medida que se reduz H/D, esta influência das dimensões da peça a observar diminui, o que aconselha a usar tensómetros de pequena altura.

Ainda não houve oportunidade de fazer um estudo sistemático do efeito da fluência nas leituras dos tensómetros alongados, o qual dependerá do valor das tensões a considerar, das propriedades do betão e da sua idade.

Tal como para os extensómetros, a correcção do efeito térmico sobre os tensómetros de qualquer tipo pode fazer-se mediante a medição da temperatura, uma vez determinado em laboratório,

em tensómetro montado no material em consideração, o respectivo coeficiente de influência. Também pode fazer-se a correcção mediante tensómetros correctores montados em peças libertas de tensões, com a vantagem de ser possível compensar os efeitos de quaisquer outras causas de variação de volume. No caso de tensómetros alongados é necessário atender à influência da rigidez do aparelho ao fixar as dimensões da peça em que ele ficará embebido.

## 8. CONCLUSÃO

Acerca da medição de deformações e de tensões «in situ», deseja-se em primeiro lugar frisar as presentes dificuldades, ainda muito sérias, que se encontram na medição directa das tensões. Além do interesse geral desta medição, ela é da maior importância no caso de materiais como o betão, os solos e as rochas, que, mesmo sob a acção de solicitações correntes, podem exibir deformações lentas importantes.

No que respeita à medição de deformações, dispõe-se hoje de técnicas satisfatórias, quer para medição em pontos da superfície quer do interior. Porém, nas medições «in situ» luta-se muitas vezes com dificuldades na compensação dos efeitos térmicos e outros, no caso das medições na superfície e de medições no interior de peças com dimensões reduzidas, dispondo-se de pouca informação sobre o mérito e as limitações das possíveis técnicas de compensação.

Quanto às medições «in situ» deve acentuar-se que elas exigem em regra longa experiência pois é necessário, para cada caso, ter em consideração os materiais e o tipo de estrutura a observar, a precisão que é razoável procurar atingir nas medições, a duração das observações, a robustez a exigir à aparelhagem durante a sua montagem e durante o período de observação, o grau de preparação do pessoal disponível, etc.

Para terminar deseja-se sòmente reiterar a afirmação, feita logo no início deste trabalho, de que o conhecimento do real comportamento das estruturas de engenharia civil é geralmente insuficiente, impondo-se pois que as instituições de investigação promovam a sua observação sistemática, em especial no que se refere às deformações e tensões desenvolvidas.

## BIBLIOGRAFIA


1. F. Hebrant, H. Louis e A. Soete, «Résultats de l'auscultation de deux ponts-route et d'un pont-rails métalliques», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct.*, C. 21, Lisboa, (1955).
2. A. Huggenberger, «L'auscultation des ouvrages en béton», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct*, C. 54, Lisboa, (1955).
3. P. Morice e G. Base, «The design and use of a demountable mechanical strain gauge for concrete structures», *Mag. Concrete Res.*, 15, No. 13, (1953).
4. M. Coyne, «Quelques résultats d'auscultation sonore sur les ouvrages en béton, béton armé ou métal», *Ann. Inst. Tech. Bât. Trav. Publ.*, Juillet-Août 1938.
5. M. Rocha, J. F. Borges e J. Marécos, «Observation of some reinforced concrete structures», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct.*, C.43, Lisboa, (1955).
6. G. Willm, «L'auscultation de barrages par pendules, clinomètres, témoins sonores , *RILEM Symp. on the Observ. of Struct.*, C. 3, Lisboa, (1955).
7. N. Davey, «Testing techniques used by the Building Research Station to measure existing stresses», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct.* C. 19, Lisboa, (1955).
8. J. Bellier e W. Ter Minassian, «Compressibilité des rochers de fondation sous les barrages», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct*, C. 31, Lisboa, (1955).
9. M. Rocha e A. Silveira, «Assessment of observation techniques used in Portuguese concrete dams», *8th Cong. on Large Dams.* Rept 42, Edinburgh, (1964).
10. R. Lorin, «Détermination de la force portante des pistes d'aérodromes», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct.*, C. 27, Lisboa, (1955).

11. E. Hognestad e I. Viest, «Some applications of electric SR-4 gauges in reinforced concrete research», *J. Am. Concrete Inst.*, (1950).

12. J. Raphael, «Determination of stress from measurements in concrete dams», *5 th Congr. on Large Dams*, Rep. 54, Stockholm, (1948).

13. E. Dehan e E. Demol, «Appareils nouveaux pour l'auscultation des ouvrages d'art», *RILEM Symp. on the Observ. of Struct.*, C.12, Lisboa, (1955).

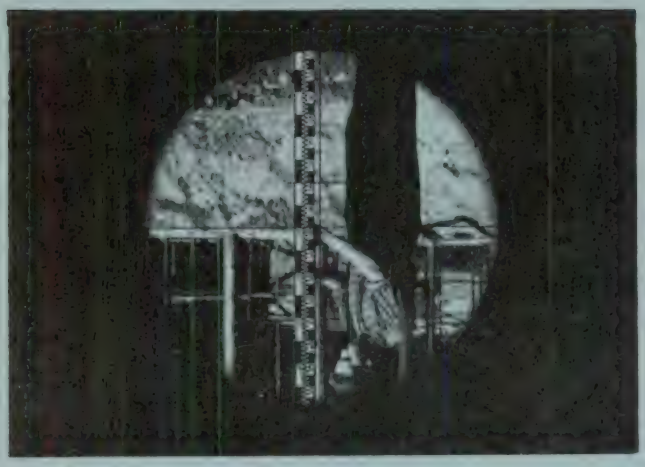
14. K. Jones, «Calculation of stress from strain in concrete», *Bur. of Reclamation, Tech. Mem.* 653, (1955).

15. M. Rocha, J. L. Serafim, A. Silveira e O. Rodrigues, «The observation of the behaviour of the Portuguese concrete dams», *5 th Congr. on Large Dams*, C.33, Paris, (1955).

16. A. Coutinho, «Théorie de la détermination expérimentale des contraintes par une méthode n'exigeant pas la connaissance précise du module d'élasticité», *Proc. Int. Assoc. for Bridge and Struct. Eng.*, Zürich, (1949).

17. E. E. McCoy, «Investigation of the improved Carlson stress meter», *Waterways Exp. Sta.*, Tech. Rept. 6-454, (1957).

ANTIGAMENTE :

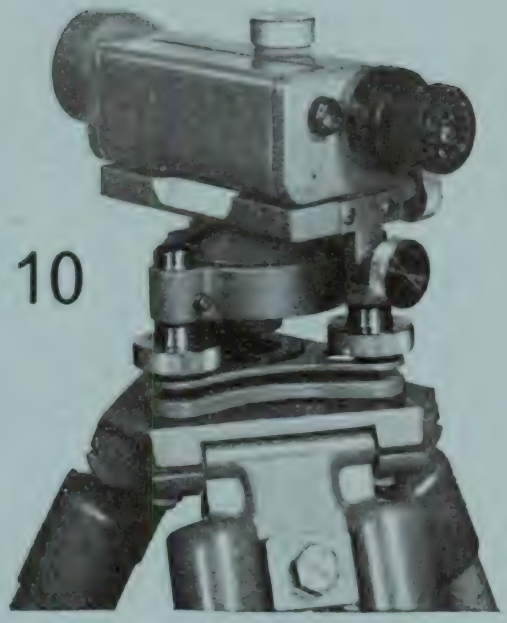


HOJE :

Com
imagem
direita
na luneta

**WILD**
**HEERBRUGG**

N 10



Trabalho cómodo e simples sem erros e sem dúvidas, sinais correctos, não invertidos, claros e rápidos.

O pequeno nível WILD N 10 com a designação «E» tem imagem direita do campo de observação na luneta. A mesma tem luminosidade igual ao modelo convencional e o mesmo tamanho.

Representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA-2 — TELEFONE 68 11 27

# BOMBAS

Se tem um problema de bombas, consulte

## VASCO PESSOA, LDA.

Rua da Boavista, 63

LISBOA

## Companhia Portuguesa de Trefilaria

S. A. R. L.

ARMADURAS PRÉ-FABRICADAS **MALHASOL**

Tensão de segurança 3.000 Kg/cm²

**AÇO BI**

Tensão de segurança 4.000 Kg/cm²

**AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO**

que pela eficiência técnica e económica a que conduzem, são um indispensável elemento na moderna construção civil

**Para qualquer obra em betão armado consulte:**

DIAL — GABINETE TÉCNICO

R. DO INSTITUTO INDUSTRIAL, 18-1.º Dt.º

TELEFONES 67 12 24/5 E 67 37 85 — LISBOA

Prédios, empenas, caves. Depósitos para águas, vinhos e aguardentes

Facultam-se certificados de ensaio dos Laboratórios Nacional de Engenharia Civil e da Junta Nacional do Vinho.

## «IMPERMEÁBILIS»

**O impermeabilizante oficialmente aconselhado em todas as argamassas de cimento**

REVENDEDORES EM LISBOA:

**João Pereira Vareiro & Filhos, Lda.**
Rua Augusto José Vieira, 12 — Telef. 84 74 80

**Manuel Pereira Matias, Lda.**
Rua de Pedrouços, 105-A — Telef. 61 11 53

**Manufacturas de Cimento Fortex, Lda.**
Estrada de Benfica, 727 — Telef. 70 21 75

**Sequeira & Santos, Lda.**
R. José Joaquim Marques, 113—Tel. 02 61 05—MONTIJO

**Distribuidor geral para todo o Império Português:**

**ANSELMO DE MATOS**

Av. Almirante Reis, 179, r/c — Telef. 4 64 39

LISBOA

## RENOLUZ

O TECTO PLÁSTICO EM ESTEIRA CONTÍNUA E EM QUADRADOS

**DIFUSOR DE LUZ**

ECONÓMICO
O SUB-TECTO IDEAL QUE EVITA OS ACABAMENTOS SUPERIORES

EFICIENTE
TOTAL AUSÊNCIA DE SOMBRAS

DECORATIVO
UMA FORMA DE DECORAÇÃO HARMONIOSA E PRÁTICA

ORÇAMENTOS GRÁTIS

# RENOR

RUA D. ESTEFÂNIA, 155-C — END. TELEGRÁFICO **RENOLE** — TELEFONE 53 77 54 - 73 57 49 — LISBOA - PORTUGAL

C. D. U. 541.138

# PEQUENAS NOTAS SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE NA CÉLULA DE HULL-RUSSELOT

## ALGUMAS APLICAÇÕES DA CÉLULA A DIVERSOS TIPOS DE ELECTRÓLISE

por ISABEL MARIA MELEÇAS GAGO
(Assistente do I. S. T.)

e por ALUNOS DO 6.º ANO DO CURSO DE QUÍMICA (1962-63)

RESUMO

*Tomando como base a cinética das descargas electroquímicas discutem-se os factores que influenciam os parâmetros da equação de Hull. Apresenta-se o caso da utilização da célula de Hull-Rousselot no estudo da electrodeposição de camadas de níquel negro, muito pouco espessas* (1).

SYNOPSIS

*The factors that influence the parameters of Hull's equation are here discussed according to the kinetics of electrochemical discharges. It's also presented the utilization of Hull-Rousselot's cell in the study of the electrodeposition of very thin layers of black nickel.*

## 1. GENERALIDADES

Duas grandezas caracterizam fundamentalmente um processo electroquímico: a tensão reaccional que, como factor intensivo da energia determina a possibilidade do fenómeno e a densidade de corrente que, «reflectindo» a respectiva velocidade, constitui o factor cinético primordial. Porque ambas se encontram indissolùvelmente ligadas parece, à primeira vista, ser suficiente fixar uma delas para a outra ficar automàticamente fixada (todos os outros factores constantes) e por ser mais fácil medir a segunda do que a primeira, é esta razão por que a prática industrial ou laboratorial se contenta em escolher, segundo o fim em vista, um valor da densidade de corrente considerado óptimo e geralmente estabelecido por modo empírico. Tal maneira de proceder é porém apenas aceitável quando não haja a possibilidade de realização da descarga doutras espécies iónicas a tensões próximas da tensão actual do electrodo, pois só então não há a recear as variações que esta geralmente sofre no decorrer da electrólise; é porém imprescindível recorrer às relações funcionais entre a tensão e a corrente (sejam elas apenas descritas por via experimental directa) sempre que se queiram determinar com exactidão valores críticos duma ou doutra, como também o é, com mais forte razão, quando se pretendam informações sobre a fenomelogia íntima dum processo.

Mas para além das relações puramente energético-cinéticas referentes ao acto da descarga pròpriamente dito, há também a considerar outros aspectos importantes das reacções electroquímicas. Porque estas se realizam na interfase metal-solução são de esperar que tanto as características do metal como as da solução influenciem fortemente o processo electroquímico.

(1) Com poucas centenas de angström de espessura.

Quanto ao metal, não falando da sua natureza nem do seu estado de superfície inicial há a considerar as prováveis modificações subsequentes a certo tipo de descargas, como por exemplo, as que conduzem à deposição de produtos sólidos; pelo lado da solução são fundamentais a sua composição qualitativa e muito particularmente a composição quantitativa na vizinhança próxima do electrodo, porque dela depende a possibilidade da solução «alimentar» a interfase fornecendo-lhe a ou as entidades que participam no processo da descarga compatível com a tensão actual do electrodo. Esta possibilidade, porém, encontra-se também condicionada por um processo que sendo igualmente cinético não é agora reacional, consistindo apenas no transporte das espécies envolvidas na descarga considerada, desde as zonas afastadas do electrodo até à interfase metal-solução.

Ora é também aqui a densidade da corrente um dos factores principais, ainda que indirecto, responsável por este transporte porque condicionando a velocidade das descargas iónicas provoca variações da concentração respectiva junto dos electrodos criando, como consequência, movimentos iónicos por difusão e por convecção. São portanto estas acções convectivas e difusivas originadas pela força osmótica da solução que, a par dos deslocamentos migratórios realizados sob a acção do campo eléctrico criado entre os electrodos, determinam os transportes de massa no seio do electrólito. É por serem todos estes factos comuns a qualquer tipo de descarga, embora afectando de forma particular cada um deles, que é hábito considerar a densidade de corrente como a grandeza de «maior vulto» em todos os estudos das reacções electrónicas, quer experimentais quer teóricas.

Mas em muitos tipos de electrólise não basta apenas conhecer as relações tensão-corrente que regulamentam um dado processo, nem tão pouco é suficiente a determinação dum valor crítico daquela ou desta; torna-se necessário conhecer também o modo como se *distribui a corrente*, isto é, como varia a sua densidade ao longo da superfície do electrodo. Em Electroquímica esta questão levanta-se sempre que um electrodo não seja plano e assuma uma forma qualquer a qual pode ser bastante irregular, como aparece na prática, e é especialmente importante quando os produtos da electrolise são sólidos e se destinam a recobrir o electrodo (caso das electrodeposições metálicas catódicas e das passivações anódicas).

O problema da determinação do modo como se distribui a corrente entre electrodos com configurações quaisquer está longe de ser fácil. A sua resolução por via teórica, isto é, partindo da «Teoria do Potencial» está confinada a casos restritos em que os electrodos se apresentam com formas geométricas simples; na maioria dos casos a resolução teórica do problema ou é impossível ou é extremamente complicada e trabalhosa. Há pois que recorrer aos métodos experimentais. Estas dificuldades são bem conhecidas dos electrotécnicos e bem conhecido um dos métodos a que frequentemente recorrem, o do «tanque electrolítico», para a resolução dos seus problemas. Este é também um método muito utilizado no estudo das diversas reoanalogias.

Grande número de problemas de Electrotecnia, em que os electrodos apresentam planos de simetria, podem ser resolvidos tratando-os como um campo plano; do mesmo modo se pode proceder em grande número de casos resolúveis por reoanalogia. Porém os estudos que essencialmente interessam à Electroquímica nem sempre se podem considerar como problemas a duas dimensões o que dificulta extremamente a sua resolução tanto mais que, como consequência da utilização da corrente contínua, quase obrigatória na maioria dos casos, a vizinhança dos electrodos passa a ser sede daquilo que na «Teoria dos Campos» se denomina «campo aplicado» e que em Electroquímica se engloba no termo genérico de «polarização». Esta pode introduzir dificuldades enormes no problema tornando-o com resolução teórica impossível e com resolução experimental difícil condicionando por vezes até mesmo uma simples determinação empírica; isto acontece quando não seja possível combater as variações de concentração locais que tornam a região dos electrodos fortemente anisotropa.

Quando porém esta polarização de concentração está ausente e a descontinuidade do potencial na interfase metal-solução resulta apenas do fenómeno de activação de transferência que se encontra ligado a toda a descarga electroquímica, é então possível, nos casos acima referidos, tratar o problema por via teórica com certa generalidade.

Deve-se, segundo supomos, a Charles Kasper (1) (do National Bureau of Standards U. S. A.) a pri-

meira (1940) aplicação da teoria do Potencial às superfícies metálicas electrizadas introduzidas em meio condutor electrolítico. Segundo Kasper esta aplicação é possível quando se verificam as seguintes condições:

*a*) A velocidade de dissipação da energia potencial entre os electrodos é uma função linear da diferença de potencial entre os mesmos.
*b*) O meio onde os electrodos imergem é homogéneo e isotropo.
*c*) O fluxo de energia dissipada através dos electrodos não perturba a sua condição de superfícies equipotenciais.
*d*) A discontinuidade do potencial na interfase metal-solução é uniforme em todos os seus pontos.

A ausência destas condições afecta a teoria por diversas formas como é fàcilmente compreensível. Quanto às duas primeiras a sua não verificação afecta a lei de Ohm pois como é bem conhecido a conductância de um meio não homogéneo nem isotropo varia tensorialmente e não escalarmente; além de que as variações locais de conductância podem conduzir a variações locais do efeito joule com reincidência sobre ela (fenómeno cruzado). A não homogeneidade do meio electrolítico verifica-se sempre que haja rápidos fluxos através da intefase electrodo-solução tendo como resultado a estratificação desta devido aos gradiantes de concentração que podem ser então apreciáveis, seguidos de consequentes acções convectivas (por gravidade e por temperatura) as quais podem provocar acentuada anisotropia como acima se disse.

Quanto às duas últimas restrições elas implicam que os electrodos se mantenham pràticamente equipotenciais em toda a superfície o que condiciona quer o tipo de electrólito em face do material do electrodo a utilizar ou vice-versa. No que respeita a este último é absolutamente necessário que não seja passivável (ao funcionar do anodo) pois as camadas de passivação não só restringem a área útil do electrodo como porque possuem uma conductibilidade muito afastada da dos metais.

No que respeita aquele pode-se talvez considerar a sua influência mais importante de que a deste, na ausência da passivação do metal e salvo casos particulares, pois um processo de descarga evolui segundo determinada relação funcional tensão-corrente que lhe é própria mas que é dependente da composição do electrolito. Assim, sob o ponto de vista estabelecido em (d) é *não só suficiente mas também necessário e fundamental, que o coeficiente angular da tangente à curva tensão-corrente se mantenha pràticamenete constante ao longo duma zona apreciável de densidade de corrente.* (1)

Todas as quatro exigências mencionadas podem ser satisfeitas com certa aproximação ainda que a electrolise se realize com intensidades apreciáveis basta para tanto escolher um metal adequado e um electrolito com a composição conveniente e promover a rápida difusão por aquecimento ou agitação de modo a evitar a estratificação respectiva.

Justifica-se assim a aplicação da teoria feita por Kasper aos electrodos em contacto com um electrolito. Porém a restrição expressa na alínea (d) pode levantar objecções, pois se é fàcilmente levado a perguntar:

1.º) Se os diversos electrolitos capazes de obedecer à condição de polarização uniforme são comparáveis entre si quanto ao efeito polarizante, isto é, quanto à extensão da «perturbação» introduzida e quais as características que devem poder servir de base como termo de comparação.
2.º) Qual o «peso» com que cada um dos efeitos, geometria das formas e acção polarizante, contribui para a repartição da corrente, (2) ou seja, a importância relativa destes dois efeitos.

Kasper não se preocupou com nenhum destes dois aspectos do problema; os seus cálculos referem-se a casos restritos, não permitindo mesmo determinar a densidade de corrente na vizinhança dos cantos e das arestas dos electrodos, mas deve-se-lhe o mérito de ter estabelecido as

(1) Ver-se-á mais adiante as razões desta exigência e as condições em que tal se pode verificar.

(2) É costume designar por *repartição primária da corrente* ou simplesmente por *corrente primária* a que resulta apenas da configuração geométrica do sistema e por *repartição secundária da corrente* ou simplesmente *corrente secundária* a que resulta dos efeitos conjuntos da geometria das formas e dos efeitos de polarização.

condições de aplicação da teoria a alguns casos práticos.

Mais tarde, outros investigadores, em especial Carl Wagner (2) retomaram o problema discutindo-o teòricamente num âmbito mais geral.

A principal conclusão que, em linhas muito gerais, se pode extrair dos estudos feitos, resume-se no enunciado duma propriedade muito simples mas muito importante:

> *Para todo e qualquer electrólito define-se um parâmetro que é numèricamente igual ao produto da conductância específica $\gamma$ do electrólito pelo coeficiente angular $dV/di$ da tangente à curva de sobretensão* (1) *respectiva*
>
> $$\gamma \, dV/di$$
>
> *de cuja grandeza depende o efeito polarizante.*

Note-se que este parâmetro tem as dimensões dum comprimento e como tal a polarização aparece agora como uma nova dimensão que um dado sistema adquire quando é atravessado pela corrente. Ao contrário das dimensões impostas pela sua própria configuração geométrica, esta dimensão «adicional» não é rígida, podendo ser ou não significativa em face daquelas, tudo dependendo do seu valor em relação à sua dimensão $d$ mais significativa.

Assim, se $d \gg \frac{dV}{di}$ o efeito polarizante é desprezável e então a geometria é preponderante. A distribuição da corrente não poderá ser alterada, depende da forma dos electrodos e sua posição relativa. Se porém, $d \ll \frac{dV}{di}$ é então o efeito polarizante que prevalece e em toda a área em que $\frac{dV}{di}$ *for constante, a densidade de corrente será uniforme ainda que o sistema electródico não apresente planos de simetria* (com excepção das arestas e dos cantos onde o regime de densidade tende a tomar valores extremos).

Estes dois são os casos limite; todas as relações intermédias possíveis.

(1) Embora constitua um hábito mau usa-se frequentemente, na maioria dos livros de Electroquímica, representar a densidade de corrente pela letra $i$, confundindo-a com a própria corrente. Seguimos pois aqui também esta notação.

No caso da electrodeposição metálica, como o parâmetro de polarização, que designaremos por parâmetro de Wagner, assume valores muito pequenos para a maioria dos electrolitos industrialmente usados para este fim, resulta que:

*a*) O efeito polarizante só será significativo em face da geometria das formas, se estas se apresentarem com dimensões muito restritas, isto é, duma ordem de grandeza não muito superior à daquele.

*b*) Pela mesma razão anterior a comparação entre dois electrolitos com composição diversa deve ser feita utilizando electrodos com pequenas dimensões.

A proposição contida nesta última alínea não é porém tão geral como à primeira vista pode parecer; de facto, a relação enunciada é restrita. As causas que a condicionam carecem de explicação mais pormenorizada como adiante se fará.

Resumindo: todos os factos mencionados bem como a consideração do parâmetro de Wagner são indispensáveis em qualquer estudo referente a electrodeposições que envolvam propriedades dos electrodepósitos dependentes da distribuição da corrente como igualmente o são sempre que se queira estudar o regime de distribuição de corrente que reina dentro duma célula de electrólise, especialmente na vizinhança dos electrodos.

Nas presentes notas aplicaremos as considerações anteriores no estudo dum caso muito particular: a pequena célula de Hull, habitualmente destinada à determinação das condições mais convenientes de emprego dos agentes tensioactivos, mas que por se prestar a qualquer tipo de descarga nós procurámos utilizar na resolução dos seguintes problemas:

*a*) Obtenção de camadas muito finas de «níquel negro» a cuja espessura correspondem dadas propriedades ópticas.

*b*) Determinação das condições mais convenientes para a obtenção dum metal em pó (cobre).

*c*) Protecção catódica (como coadjuvante dos inibidores) durante a decapagem ácida dos metais.

Porque durante estes estudos, especialmente nos dois últimos, se nos depararam certas dificuldades, tornou-se necessário analisar pormenorizadamente as condições gerais em que a célula pode fornecer informações exactas. Como a bibliografia sob este assunto é restrita e porque os estudos dos problemas enunciados se tornam então melhor justificados e ainda porque julgamos o assunto com interesse, afigura-se-nos útil expor em notas prévias uma revisão crítica dos factores que influenciam o irregular regime de distribuição de corrente dentro da célula.

## 2. A CÉLULA DE HULL - ROUSELOT

A célula de Hull (fig. 1) pode-se considerar derivada dum condutor linear semi-infinito do qual um dos electrodos tivesse rodado em torno duma das arestas verticais, de um ângulo de 39°, no sentido do prolongamento do condutor; a sua secção recta é pois um trapézio rectângulo. A cuba é geralmente feita de matéria plástica e os electrodos forram, no interior, completamente, duas das faces: a inclinada e a que lhe fica fronteira a qual é perpendicular às duas restantes.

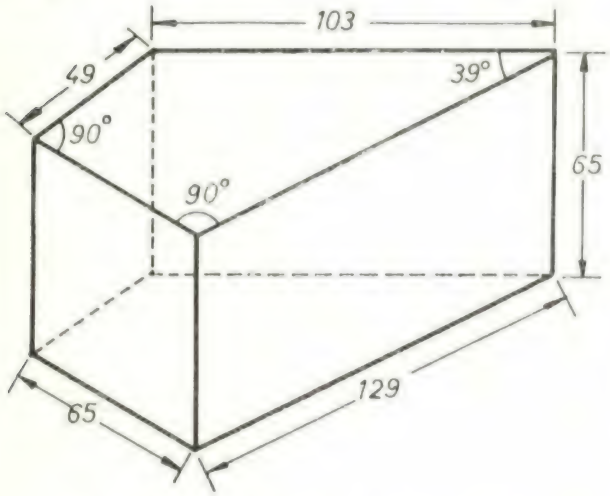



Fig. 1 — Esquema de cuba da célula de Hull
Dimensões em mm

O electrodo inclinado é sempre o electrodo em estudo e porque a célula tem sido essencialmente utilizada para deposições catódicas também é costume designá-la por *célula de cátodo inclinado.*

A sua importância vem-lhe duma propriedade particular do seu cátodo, a qual consiste na repartição logarítmica da densidade de corrente (contada segundo uma direcção paralela ao plano da base) e *lhe confere a possibilidade de constituir um «espectro» estrutural da electrodeposição metálica correspondente a uma multiplicidade de condições.*

Outra propriedade ainda torna a célula bastante prática: a sua pequena capacidade útil, cerca de 257 ml, o que permite ensaiar ràpidamente e sem grande consumo, apreciável número de soluções com diversa composição, estudando o efeito conjunto da densidade da corrente e da composição da solução.

Nestes dois factos reside a grande vantagem prática desta célula que é devida a O. Hull (3).

Há poucos anos R. Rousselot (4) um dos autores que recentemente se tem ocupado dos problemas de repartição da corrente nos electrólitos, modificou a cuba desta célula fazendo encastrar a extremidade do cátodo, mais próxima do ânodo, na parede da própria cuba, evitando deste modo o efeito prejudicial do adensamento das linhas de corrente que sempre se verifica nas arestas dos condutores.

Este aperfeiçoamento de cuba primitiva é bastante conveniente embora implique maior cuidado na sua construção. Nos nossos ensaios usámos sempre uma assim modificada que denominamos de Hull-Rousselot.

A única dificuldade de utilização da célula de H-R, quando se pretendam resultados quantitativos bastante precisos, resulta do facto de se ter de recorrer a processos empíricos para estabelecer a expressão analítica que descreve a relação logarítmica entre a densidade de corrente e as coordenadas de cada ponto do cátodo, pois é impossível dispor dum método teórico de cálculo. Como é fácil pressupor a determinação desta «equação da célula» está sujeita a diver-

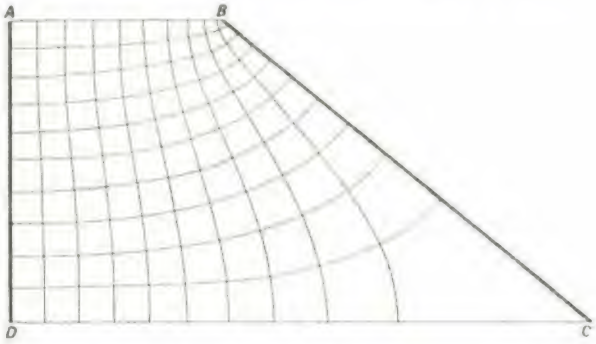



Fig. 2 — Repartição primária sobre um cátodo inclinado.
Linhas equipotenciais e de equifluxo
segundo Rousselot (4)

sas causas de erro que é conveniente conhecer com pormenor a fim de poder utilizá-la com critério.

A equação vulgarmente aceite é devida a O. Hull e obtida, segundo supomos, a partir dum método experimental denominado «método da sonda»; a sua forma é:

$$i = I\,(a - b \log x) \qquad (2-1)$$

onde I representa a intensidade total que atravessa o circuito, *a* e *b* são constantes e i a densidade de corrente em qualquer ponto do cátodo à distância x contada a partir da aresta mais próximo do ânodo, situado sobre uma faixa com 1 cm de altura distanciada 2,5 cm de fundo da cuba.

A expressão descrita dá portanto o valor de i correspondente à corrente secundária, isto é, descreve o regime «actual» do cátodo.

Não nos foi possível ler a memória original de O. Hull (1) mas recorremos à citação do livro de Rousse'ot (4) a respeito dos respectivos resultados os quais seriam:

*a*) A repartição secundária da corrente é sensìvelmente independente do electrolito utilizado o que permite obter uma repartição média válida para todos os banhos.

*b*) As curvas são homotéticas em relação às ordenadas i.

Rousselot, por sua vez, usando métodos experimentais diferentes dos de Hull e mais rigorosos determinou a repartição primária da célula modificada, estabelecendo uma equação do mesmo tipo anterior. Segundo este autor os seus resultados confirmariam pois ambas as conclusões anteriores o que lhe permitiu afirmar serem as repartições primária e secundária de célula sensìvelmente idênticas, ou o que é o mesmo, que o efeito polarizante é desprezável em face das dimensões do cátodo (50 $cm^2$) e da distância entre electrodos (cujo valor mínimo é de 4,9 cm).

Contudo Rousselot faz certa restrição à generalidade destas conclusões, chamando a atenção para o caso daqueles «banhos» que apresentam curvas de sobretensão apreciàvelmente díspares. Assim os «banhos» alcalinos cujos iões metálicos se encontram fortemente complexados como os de cianeto por ex.: apresentam sobretensões muito mais elevadas do que os banhos ácidos; neste caso a homotetia não seria verificável quando se usam intensidades totais apreciàvelmente diferentes pois que às baixas densidades de corrente os coeficientes angulares das curvas são bastante mais elevados do que às densidades médias. Considera porém Rousselot que, para *a maioria dos banhos habitualmente usados em galvanoplastia o valor de 2 A se pode considerar como uma intensidade total conveniente para originar zonas catódicas em que aquelas propriedades se verificariam, ou o que é equivalente, zonas em que a e b funcionariam como constantes «universais» aplicáveis a todos aqueles banhos* (1).

Note-se que Rosselot, na memória citada, se limita apenas a estas breves considerações e trata o problema muito resumidamente não se encontrando justificação para o valor 2 A acima mencionado, extremamente arbitrário.

Um apreciável número de ensaios a que procedemos, com diversos banhos, bem como os resultados doutros operadores mostraram-nos que as conclusões anteriores nem sempre são aplicáveis na prática e razões de ordem teórica e experimental levam-nos a considerar que a equação da célula não deva ser tomada com tão grande generalidade.

As razões desta afirmação resultam da análise dos factores que regulamentam as descargas em geral e das condições actuais em que estas se processam dentro da célula. Para os justificar discutiremos portanto uns e outros, tomando como base o parâmetro de polarização pois o que se nos afigura fundamental é saber se sob um regime actual da célula, *qualquer que seja*, este parâmetro se mantém ou não invariável, se é ou não significativo.

Porque a respectiva variação se encontra dependente da sobretensão e da conductância do electrólito, será a variação destas duas características eléctricas do sistema que importa considerar.

### 2.1 — Factores que influenciam o parâmetro de Wagner

Como é evidente, a sobretensão influencia este parâmetro por intermédio do coeficiente diferen-

(1) Os valores aprsesentados por Rousselot a — 4,28 b = 4,20 foram obtidos por meio de ensaios correspondentes à distribuição primária da corrente.

cial $\frac{dV}{di}$. Estudá-lo equivale pois a estudar os factores que influenciam a inclinação da tangente em cada ponto da curva da sobretensão. Porque a forma desta curva depende das diversas causas que originam a sobretensão convém analisar cada troço da curva separadamente.

### 2.1.1. — Activação de transferência

A zona da curva desde as muito baixas até médias densidades de corrente encontra-se fundamentalmente sob a influência dos fenómenos de activação de transferência. Então se se considerar a sobretensão que acompanha a descarga catódica, apenas como resultante duma barreira situada na interfase metal-solução, isto é, se desprezarmos os fenómenos de cristalização subsequentes a todo o acto de descarga metálica e bem assim os fenómenos de difusão quer na solução quer no metal; se ainda se considerar que a distribuição da densidade da corrente i é uniforme em toda a área onde se deposita o metal e que esta varia pouco durante a descarga (ou seja, admitindo um factor de rugosidade muito próximo da unidade) pode-se traduzir a descarga metálica utilizando a lei da sobretensão das reacções de 1.ª ordem escrita sob a sua forma mais simples.

$$i = i_0 \left[ \epsilon^{-\frac{\alpha zF}{RT}\eta} - \epsilon^{\frac{\beta zF}{RT}\eta} \right] \qquad (2\text{-}2)$$

E porque, dadas as relações entre V e $\eta$ os coeficientes $\frac{dv}{di}$ e $\frac{d\eta}{di}$ são numéricamente iguais vem, diferenciando (2-1):

$$\left(\frac{d\,|\eta|}{d\,|i|}\right)_T = \left(\frac{d\,|V|}{d\,|i|}\right)_T = \frac{RT}{zF} \cdot \frac{1}{i_0} \left[ \frac{1}{\alpha\epsilon^{-\frac{\alpha zF}{RT}\eta} + \beta\epsilon^{\frac{\beta zF}{RT}\eta}} \right] \qquad (2\text{-}3)$$

Quer dizer, o coeficiente $\frac{dV}{di}$ relativo a um dado processo caracterizado pela respectiva corrente de escambo $i_0$ e pela forma da barreira $\alpha$ varia apenas [1], a temperatura constante, com o recíproco da soma das exponenciais representativas da corrente progressiva e regressiva, multiplicados pelos coeficientes de transferência correspondentes às barreiras dos processos respectivos.

Ora se se admitir, como pede a teoria, que $\alpha + \beta = 1$ é fácil verificar a seguinte relação:

$$\frac{|ip|}{|i_r|} = e^{\frac{zF}{RT}|\eta|} \qquad (2\text{-}4)$$

Isto é: *a corrente regressiva apenas às muito baixas sobretensões atingirá valores significativos em face da primeira.*

Resulta pois daqui que o coeficiente $\frac{dV}{di}$ deverá tomar valores elevados na região das muito baixas sobretensões [2] dependendo a sua variação, dentro desta zona, da proporção relativa daquelas duas correntes segundo (2-4); como a relação de dependência é exponencial as variações serão mais ou menos bruscas ao longo de toda aquela zona.

Mas esta zona só em casos muito particulares interessa às electrodeposições metálicas; é a região das densidades médias, ou seja, aquela a partir da qual a corrente regressiva pode ser desprezável, que oferece maior interesse para estes fins.

Neste caso pode-se então escrever:

$$\frac{d\,|V|}{d\,|i|} = \frac{d\,|\eta|}{d\,|i|} = \frac{RT}{\alpha zF} \cdot \frac{1}{i_0} \cdot \frac{1}{\epsilon^{\frac{-\alpha zF}{RT}\eta}} \qquad (2\text{-}5)$$

---

(1) A variação dV é contada na direcção do normal ao electrodo no sentido do metal para o electrólito.

(1) Na realidade, embora a expressão (2-1) seja correntemente utilizada, a lei geral da sobretensão é mais elaborada, pois os coeficientes de transferência, representados por $\alpha$ e $\beta$ aqui considerados invariáveis, se devem desdobrar em duas componentes: uma dependente das propriedades da solução e outra com características eléctricas, dependendo portanto de sobretensão. Nestas condições a expressão (2-2) complicar-se-ia. Afigura-se-nos porém ser suficiente a aproximação considerada para a simples demonstração que se pretende.

(2) As sobretensões variam no mesmo sentido da tensão dum electrodo. As tensões catódicas decrescem à medida que a electrólise progride (Convenção europeia de Sinal).

expressão que mostra ser o coeficiente $\frac{d\eta}{di}$ apenas dependente, para uma dada temperatura, do recíproco do produto $i_0 e^{-\frac{\alpha z F}{RT}\eta}$ ou seja, do recíproco da corrente. Assim, quando esta atinge valores muito superiores à corrente de escambo, portanto quando $e^{-\frac{\alpha z F}{RT}\eta} >> i_0$ o coeficiente decrescerá contìnuamente atingindo valores muito pequenos sem, contudo, se anular pois que, quando $\eta$ aumenta exageradamente, outro fenómeno, a difusão, se vem sobrepor à activação de transferência.

É pois nesta região que o coeficiente diferencial atinge valores diminutos e na qual portanto o parâmetro de Wagner pode ser insignificante, tudo dependendo das dimensões do sistema electródico.

Foram possìvelmente estas duas razões que, aliás, se deduzem intuitivamente da observação das curvas de sobretensão, que serviram de base às afirmações de Rousselot atrás mencionadas.

Porém outro facto há a atender no caso da célula de H.R; em certos métodos usados para a determinação das constantes $a$ e $b$ da equação de Hull, muito especialmente no «método da sonda», a superfície do cátodo não é totalmente interessada nas medidas, mas apenas uma faixa útil tendo sòmente 1 cm de altura. Ora nestas condições as pequenas variações de parâmetro de Wagner passam a ser significativos e não se podem desprezar muito especialmente quando se pretenda comparar os efeitos polarizantes de dois ou mais «banhos» diversos. Com efeito, suponhamos que $i_0 \simeq \exp \frac{\alpha z F}{RT}\eta$; então $\frac{d\eta}{di}$ depende apenas do produto $\alpha z$ (a $T = c^{te}$). Ora para os diversos «banhos» $\alpha$ pode variar entre 0,25 e 0,8 (ou mais) e z geralmente de 1 a 2 e portanto os valores extremos do produto serão 0,25 e 1,6, valores estes suficientes para influenciar $\frac{dV}{di}$ de modo significante em relação à dimensão característica de 1 cm.

São estas as causas pelas quais a homotetia que, na região das muito baixas sobretensões é manifestamente inexistente, o pode ser também na região nas sobretensões médias, a despeito das pequenas variações do coeficiente diferencial ao longo dum mesmo processo de descarga.

O quadro seguinte mostra, por meio de dados numéricos obtidos a partir do cálculo teórico, a influências dalgumas características cinéticas sobre o coeficiente diferencial e portanto sobre o parâmetro de Wagner no caso de iões de metais de tipos diversos: um metal normal (alta corrente de escambo) e um dos metais de transição (baixa corrente de escambo). A fim de pôr em evidência a influência desta característica importante dum processo de descarga escolheram-se, para exemplo, dois metais com a mesma valência, admitindo que ambas as descargas estão dependentes do mesmo tipo de barreira simétrica $\alpha = \beta = 0{,}5$. A fig. 3 mostra as curvas de sobretensão teóricas correspondentes aos dois casos.

Os cálculos foram feitos a partir quer das equações (2-2) e (2-3) ou ainda segundo uma expressão mais cómoda de as utilizar às baixas sobretensões e válida para o caso em que $\alpha = \beta = 0{,}5$:

$$i = 2 i_0 \, \mathrm{sh} \frac{\alpha z F}{RT} |\eta| \qquad (2\text{-}6)$$

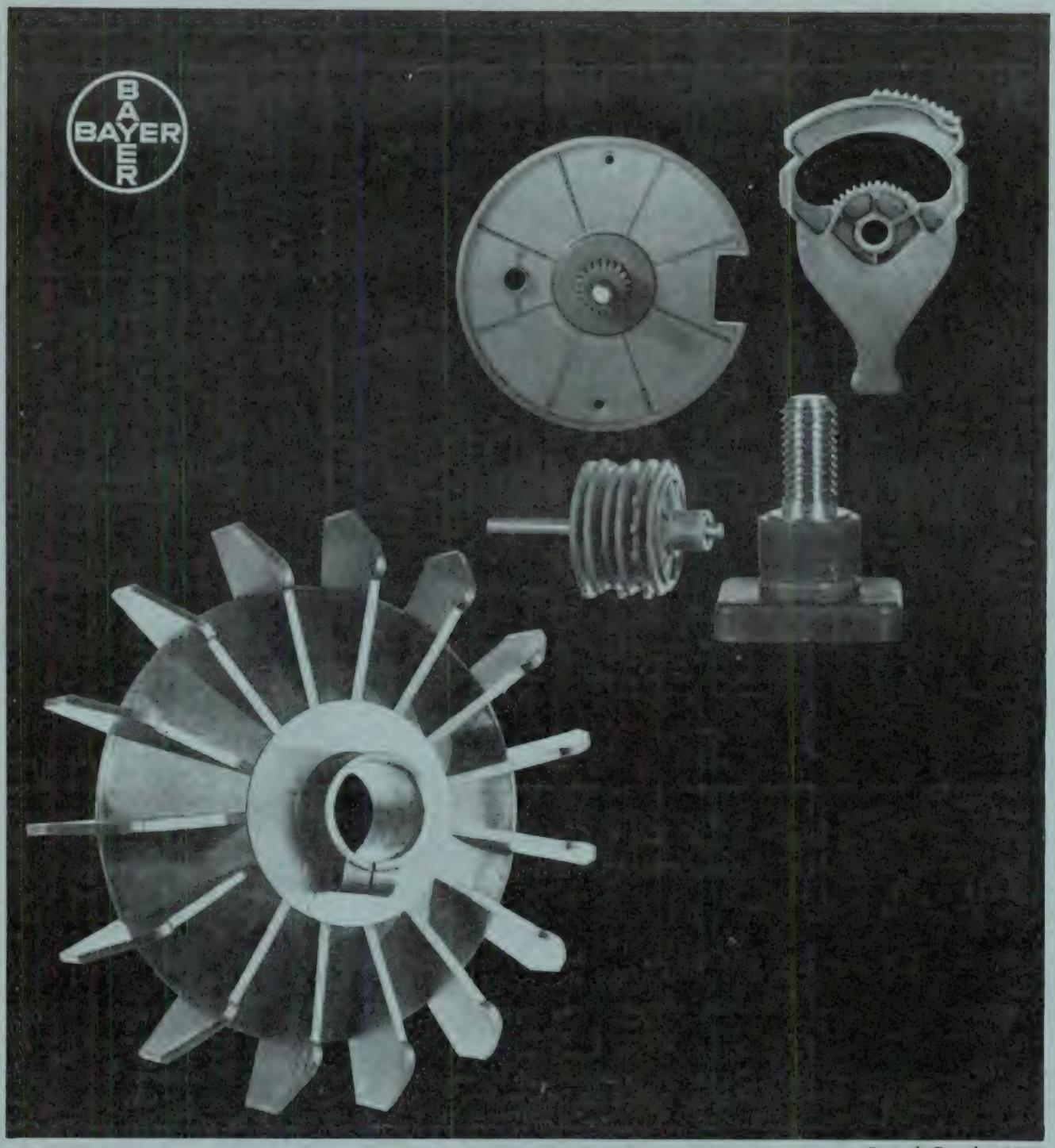
$$\left(\frac{d|V|}{d|i|}\right)_T = \frac{RT}{zF} \cdot \frac{1}{i_0} \cdot \frac{1}{\mathrm{ch}\left(\frac{\alpha z F}{RT}|\eta|\right)} \qquad (2\text{-}7)$$

2.1.2. — **Difusão e convecção natural**

Vejamos o que se passa nas zonas das «altas» e «muito altas» densidades de corrente. A equação (2-2) não é agora aplicável porque a difusão e convecção são preponderantes e como tal o regime de descarga passa a ser função do tempo e das coordenadas da superfície catódica (independentemente da sua repartição logarítmica).

O tratamento matemático dum tal regime é, como se sabe, sempre difícil, mas dentro da célula de Hull é certamente impossível pois as condições reais que ali se realizam implicam que a difusão se dê em todos os sentidos de forma não uniforme. Além disto, a zona das altas densidades é uma zona em que o metal se descarrega sob a forma pulverulenta alterando assim a microgeometria da superfície do electrodo e portanto a área efectiva. Ainda, às muito altas densidades a descarga do hidrogénio vem provocar a agitação irregular da camada hidrodinâmica da vizinhança do electrodo.

Definir um parâmetro de polarização nesta região é fictício. O que se torna fácil é prever




*Peças de Durethan BKV*

# Esta hélice de ventilador tem de funcionar com 2400 rotações por min. a 80°C. positivos: portanto ®Durethan BKV.

Antigamente estas hélices de ventilador eram de metal fundido. Os termoplásticos vulgares não podiam ser empregados porque não resistiam à dura prova a que está sujeito o material. O Durethan BKV (poliamida 6 reforçada com fibra de vidro) satisfac estas exigências. Resiste a temperaturas até 190 °C. segundo Martens.

Fazendo as hélices de poliamida 6 reforçada com fibra de vidro, pelo processo de moldação por injecção, não só se evita o peso elevado e a corrosibilidade do metal, como também se conseguem melhores tolerâncias. Ao contrário da fundição de metal sob pressão, a fabricação pelo processo de moldação por injecção não necessita de trabalho de acabamento. Além disso quase sempre as hélices metálicas precisam de ser equilibradas posteriormente.

O Durethan BKV distingue-se pelas seguintes propriedades:
- alta resistência ao calor
- resistência invulgar à flexão e à tracção
- grande dureza
- inalterabilidade das dimensões a temperaturas alternadas
- resistência absoluta aos óleos e às gorduras.

Tem problemas que desejaria resolver com Durethan BKV? Escreva aos nossos representantes que de bom grado o auxiliarão.

durethan bkv

**S.A.R.L. QUIMICOR**, Representante em Portugal:
Lisboa: Rua Sociedade Farmacêutica, 3, Tel. 42 194
Porto: Rua de Santos Pousada, 441, Tel. 54 141

3254

INTERNATIONAL HARVESTER

para
equipamento
de
construção

Consulte a Secção Industrial de

FASSIO, Lda.

20, Rua Jardim do Regedor, 32

Tel. 36 19 02 LISBOA 2

# Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

**Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português**

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

| Sobre tensão $\lvert \eta \rvert$ (mv) | Densidades de corrente em $Acm^{-2}$ (Calc.) $z = 2$; $\alpha = \beta = 0,5$; $\theta = 25°C$ | | Parâmetro de Wagner cm (Calc) Admitindo $\gamma_1 = \gamma_2 = 26.10^{-3}\ \Omega^{-1} cm^{-1}$ $\theta = 25°C$ | |
|---|---|---|---|---|
| | $i_0 = 2.10^{-5}\ A\,cm^{-2}$ | $i_0 = 2.10^{-9}\ A\,cm^{-2}$ | | |
| | $i_1$ | $i_2$ | (1) | (2) |
| 10 | $1,60 \cdot 10^{-5}$ | $1,60 \cdot 10^{-9}$ | 30,8 | $30,8 \cdot 10^{4}$ |
| 30 | 5,80 » | 5,80 » | 15,7 | 15,7 » |
| 50 | 13,8 » | 13,8 » | 9,3 | 9,3 » |
| 75 | 36,2 » | 36,2 » | 3,7 | 3,7 » |
| 100 | 98,8 » | 98,8 » | 1,3 | 1,3 » |
| 120 | $2,20 \cdot 10^{-3}$ | $2,20 \cdot 10^{-7}$ | 0,92 | $92 \cdot 10^{2}$ |
| 130 | 3,28 » | 3,28 » | 0,40 | 40 » |
| 150 | 7,30 » | 7,30 » | 0,18 | 18 » |
| 200 | $4,90 \cdot 10^{-2}$ | $4,90 \cdot 10^{-6}$ | 0,014 | $14 \cdot 10$ |
| 230 | — | 15,9 » | | 4,5 » |
| 250 | | 34,7 » | | 1,9 » |
| 300 | | $2,45 \cdot 10^{-4}$ | | 2,7 |
| 330 | | 7,98 » | | 0,80 |
| 350 | | $1,78 \cdot 10^{-3}$ | | 0,31 |
| 380 | | 5,54 » | | 0,12 |
| 390 | | 7,98 » | | |
| 400 | | 12,1 » | | |

qualitativamente a sua variação partindo da observação das curvas de sobretensão experimentais ou ainda por analogia forçada, com o que se passa em regime de difusão linear e de convecção natural.

Partindo então duma descarga sujeita a difusão linear pode-se escrever a axpressão que dá a tensão do electrodo:

$$V = V_{1/2} + \frac{RT}{d\,z\,F} \ln \frac{i_l - i}{i} \qquad (2\text{-}5)$$

onde $V_{1/2}$ e o valor que V toma quando $i = \frac{1}{2}\, i_l$, valor que é constante para uma dada temperatura (na ausência da convecção).

Será pois

$$\frac{dV}{di} = \frac{RT}{\alpha\,z\,F} \cdot \frac{i_l}{i_l - i} \cdot \frac{1}{i} \qquad (2\text{-}6)$$

quer dizer: quando a corrente atinge o seu valor limite, o coeficiente diferencial tende para infinito tal como a própria tensão do electrodo. A zona da corrente limite é pois uma zona em que a variação deste coeficiente é brutal. É o que se observa nas curvas experimentais.

Quando a convecção acompanha o efeito difusivo o problema torna-se ainda mais complicado pois a densidade de corrente varia com a profundidade. No caso da convecção laminar o valor da densidade a cada altura lx do electrodo é dado pela expressão de Ostrach:

$$i_{l_x} = 0,677\ z\,F\,D^{3/4}\,C_0^{5/4} \left[\frac{g\,\gamma}{\eta_{cin} \cdot v}\right]^{1/4} . l_x^{-1/4} \qquad (2\text{-}7)$$

onde se representa a velocidade do fluido, g a aceleração da gravidade; $\gamma$ um coeficiente dependente da densidade; $\eta_{cin}$ — viscosidade cinemática, mostra que a corrente varia com a densidade da camada hidrodinâmica de convecção dependendo também da coordenada do ponto considerado.

A altura $l_x$ é contada a partir da extremidade

inferior do electrodo; quer dizer, nas zonas superiores do electrodo a densidade de corrente é inferior à das zonas profundas.

devido à presença de $H_2$ gasoso; c) aumento do pH com possibilidade de precipitação dos iões metálicos.

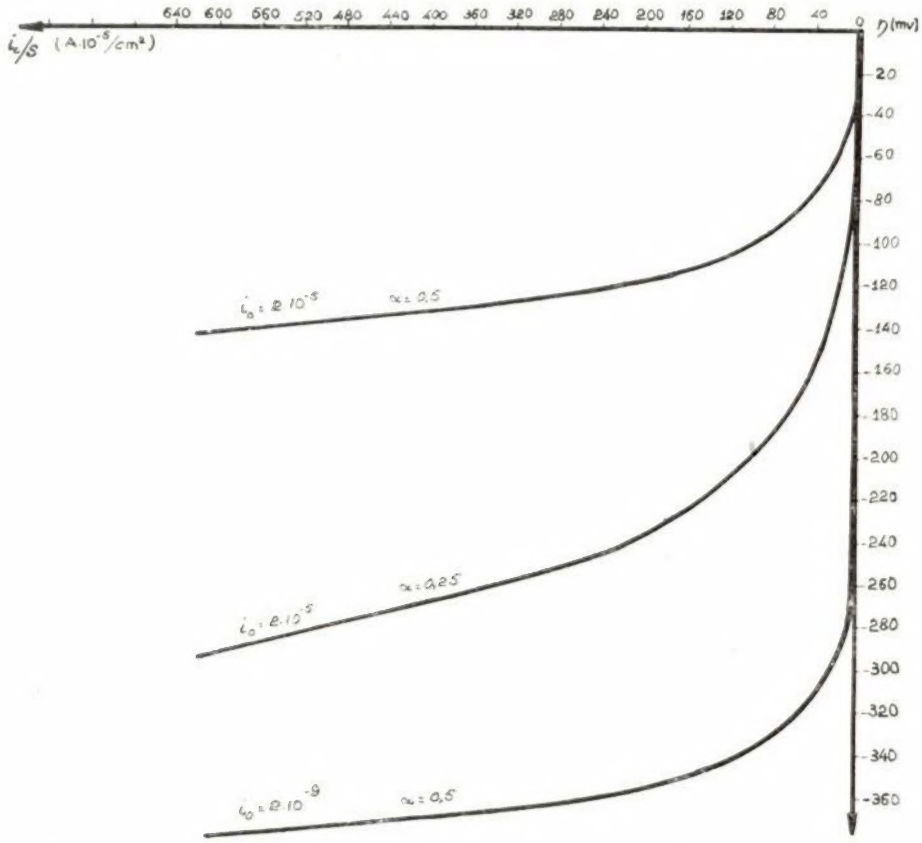



Fig. 3 — Curvas de sobretensão teóricas correspondentes a descargas com diversas correntes de escambo $i_0$ e diversas formas de barreira ($\alpha$)

### 2.1.3 — Conductância

Esta é influenciada pelos fenómenos anteriores e pela temperatura. Contudo a variação de concentração em iões metálicos pouco deve afectar a conductância em virtude do excesso de iões indiferentes que sempre estão presentes. Apenas os iões $OH_3^+$, usados sempre que possível como iões «indiferentes» em virtude da sua mobilidade ser muito superior à dos outros iões, podem ter influência apreciável sobre a conductância. De facto, às altas densidades de corrente realiza-se também a sua descarga o que, durante uma electrólise prolongada pode ter as seguintes consequências importantes: a) diminuição da conductância por diminuição dos iões $OH_3^+$; b) aumento de resistência da interfase metal-solução

### 2.1.4 — Temperatura

Por razões evidentes convém manter a temperatura constante. Sendo a cuba de material mau condutor térmico, vidro acrílico ou semelhante, torna-se difícil manter a constância desejada. Na ausência de agitação mecânica e quando se usam intensidades elevadas a anisotropia térmica é apreciável.

## 2.2 — Homotetia

Teria sido conveniente relacionar a equação de Hull com as equações cinéticas. Pelas razões expostas compreende-se que uma tal equação é impossível. Resta-nos um raciocínio qualitativo para discutir a homotetia, baseado, porém, nas relações quantitativas anteriormente expostas.

As zonas extremas do cátodo da célula de H — R, encontram-se sempre sujeitas a valores da densidade suficientemente díspares, portanto pode-se afirmar que, dum modo geral (excepto com muito baixas intensidades totais), abrangerá todas as zonas duma curva de sobretensão; isto é, haverá sempre diversas bandas do cátodo sujeitas a regimes diversos (e até variáveis no tempo). Se se imaginar idealmente cada zona duma curva de sobretensão projectada sobre a área catódica (Fig. 4), obteremos as bandas A' B', B' C', C' D', D' E'. Estas podem ser alargadas ou reduzidas, deslocando-se ao longo do cátodo segundo o valor da intensidade total.

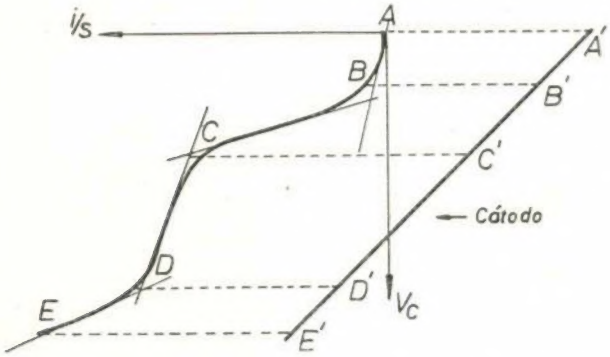



Fig. 4 — Projecção ideal dos diversos troços duma curva de sobretensão catódica sobre o cátodo da célula de H. R.

A' B' — Banda das muito baixas sobretensões
B' C' — Banda das sobretensões médias (depósitos metálicos coerentes).
C' — Início da deposição do metal em pó
C' D' — Banda da difusão e convecção (metal pulverulento)
D' E' — Banda das muito altas d. c.; descarga de $H_2$ forte convecção

A homotetia expressa na equação de Hull é pois fictícia porque pode haver sobreposição ou até mesmo desaparecimento duma das bandas se se fizer variar I dentro de limites muito afastados.

Estes factos restringem pois o limite de validade da equação de Hull, como também mostram não existir portanto qualquer razão, que não empírica, para usar um valor prefixado para a intensidade total.

Em resumo: como base em tudo o que se disse resulta que, para se utilizar convenientemente a célula de Hull-Rosselot se deve atender que:

*a*) A repartição secundária da corrente pode divergir apreciàvelmente de corrente primária da célula.
*b*) Na ausência de agitação mecânica pode existir mais do que uma zona obedecendo à equação de Hull, cada uma das quais com constantes *a* e *b* diversas (coeficientes diferenciais diversos).
*c*) Os ensaios dentro da célula não devem ser muito prolongados especiàlmente com electrólito tranquilo.
*d*) A homotetia é restrita.
*e*) A comparação entre diversos banhos quanto ao efeito polorizante deve ser feita com cuidado especialmente quando se usem métodos que utilizem apenas uma parte restrita da superfície catódica.

*Por todas estas razões é pois aconselhável verificar, ou seja, determinar em cada caso as «constantes» da equação.*

### 2.3 — Métodos experimentais de obtenção dos contantes da equação

Como é de prever, a determinação dos constantes tem de ser realizada experimentalmente.

Podem-se utilizar vários métodos que omitimos para não alongar estas notas; como é evidente deve-se procurar reduzir as causas de erro que os influenciam.

Apesar das dificuldades que o uso desta célula implica, ela é útil em muitos casos, evidentemente naqueles em que se procure resolver ràpidamente um problema por via experimental. As tentativas que evita e portanto o tempo que economiza «absolvem-na» de tanto empirismo.

Damos a seguir um exemplo em que a célula presta bom auxílio.

# BREVES APONTAMENTOS SOBRE A ELECTRODEPOSIÇÃO DE CAMADAS DE «NÍQUEL NEGRO» COM PROPRIEDADES ÓPTICAS SELECTIVAS [1]

Por JORGE DIAS
M. Q. MAIA DE LOUREIRO
Do Curso de Química de 1962-63

Desde há muito que as camadas de negro de níquel, realizadas por electrodeposição, são utilizadas para aplicações diversas todas porém com idêntica finalidade : obtenção de superfícies negras não reflectoras. Recentemente estudos feitos por H. Tabor e outros (6) durante o período de 1955-63, vieram mostrar que tais camadas, quando muito finas e associadas a uma base metálica conveniente, possuem propriedades ópticas extremamente importantes, entre elas a de se comportarem pràticamente como um verdadeiro «corpo negro» em relação a uma determinada zona de comprimentos de onda da radiação electromagnética, permitindo que essas camadas sejam utilizáveis para fins específicos.

A principal finalidade daquelas investigações consistiu na obtenção de superfícies aptas a comportarem-se como colectores solares, os quais, por definição, servem para converter a energia solar em energia térmica por absorção da radiação incidente conseguida à custa da selectividade que essas superfícies apresentam às diversas radiações. Assim, um bom colector solar deve ser altamente absorvente das radiações da zona visível do espectro e altamente reflector para o infravermelho pois que a absorção do espectro visível nestas camadas se dá acompanhada do fenómeno de interferência total, com extinção da luz, as ondas luminosas absorvidas mudando a sua frequência para a zona do infravermelho longínquo. Por outras palavras as superfícies convenientes para um colector solar devem ser altamente selectivas, com elevada absortância para os comprimentos de onda correspondentes ao espectro visível, especialmente na banda do verde (maior energia por unidade de comprimento de onda) e baixa emitância (ou elevado poder reflector) para os grandes comprimentos de onda.

Os colectores solares comportam-se pois como filtros ópticos para determinadas radiações.

Uma das superfícies mais intensamente estudadas por aqueles autores, obedecendo às condições necessárias àquele fim, foi a superfície obtida por electrodeposição duma película de «negro de níquel» sobre uma boa base reflectora. Esta película obedece aos requisitos necessários, isto é, tem um índice de refracção suficientemente diverso do do ar e tal que se apresenta transparente à radiação incidente e garante uma elevada absorção da radiação visível por interferência total, e uma reflexão perfeita da radiação infravermelha por parte do metal-base que, para o efeito, deve ser, em princípio, perfeitamente polida.

Estas camadas formam-se por electrodeposição e, como é natural esperar, dada a composição do «banho» de electrólise, a espessura e constituição respectiva, variam com as densidades de corrente e o tempo de electrólise. A sua estrutura é bastante complexa, mas é certamente esta complexidade a responsável pelas propriedades curiosas que possuem. De facto, Tabor e colaboradores verificaram experimentalmente, medindo algumas das constantes ópticas interes-

---

(1) Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, donde têm partido tantas e honrosas iniciativas, coube ainda também esta, a de ter dado início ao estudo da Energia Solar cuja aplicação parece deva estar altamente indicada no nosso País.

O «reflexo» deste assunto foi trazido até ao Laboratório de Electroquímica do I.S.T. pelo Aluno Jorge Dias que então trabalhava no LNEC como tarefeiro : foi por este Aluno ter manisfestado grande interesse em se ocupar das questões relacionadas com a obtenção das camadas de «níquel negro» que o estudo destas passou a constituir parte dum trabalho experimental da Cad. de Lab. III (Ano lectivo 1963).

sando a selectividade, que estas são função da composição e da espessura das camadas; isto é muito importante pois se torna então possível aproveitá-las para preparar *filtros ópticos com propriedades pre-determinadas*, o que permite estender o domínio de aplicações destas camadas a outros fins diversos.

A par destas observações foi realizada a análise matemática do problema, como apoio aos factos experimentais, visando quer a interpretação dos factos observados quer a determinação dos factores de que depende a selectividade. Esta análise mostrou precisamente que a utilização duma camada simples, de estrutura uniforme impõe severas limitações nas propriedades ópticas da superfície, nomeadamente o índice de refracção, espessura da película, a fim de obter a interferência total (blooming), enquanto que a utilização de camadas duplas permite uma infinidade de combinações permitindo o «blooming».

Mas as qualidades duma superfície selectiva não dependem apenas da película de negro de níquel, como também das propriedades ópticas do metal de base. Como é evidente, este deve apresentar uma baixa emissividade na zona dos infravermelhos.

Uma superfície destinada a colector solar deve porém ainda ser estável durante o aquecimento prolongado e ser resistente aos agentes atmosféricos. Como as camadas absorventes depositadas sobre um metal de base são pouco espessas, o negro de níquel é depositado com espessuras da ordem de 100 a 250Å, não podem proteger o metal contra a corrosão atmosférica, pelo que, na escolha deste, se deve atender também a este facto.

## 1 — As camadas de «niquel negro» como superfícies selectivas

Com estas camadas conseguiram os autores citados obter absortâncias de 0,91 a 0,94 e emitâncias de 0,06 a 0,18 e menos ainda com películas duplas, propriedades estas que os tornam muito convenientes para poderem ser utilizados nos colectores solares. Actualmente encontram-se aplicados em larga escala nos aquecedores de água.

As camadas de «níquel negro» são obtidas por electrodeposição sobre superfície adequada, a partir dum electrólito contendo iões de níquel, zinco, amónio e tiocianato, donde resulta que, na composicão daquelas, entram $N_i$ $Z_n$ e S, além dos óxidos e hidróxidos dos metais.

No gráfico da fig. 5 estão indicadas as percentagens dos principais constituintes que entram na composição das camadas em função do

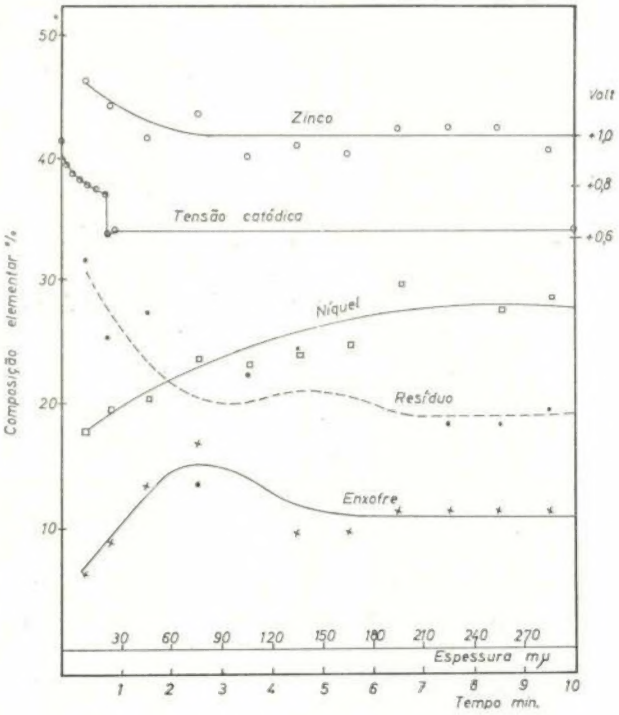



Fig. 5 — Composição elementar duma camada de «níquel negro em função de tempo de electrólise e da espessura, segundo os gráficos de H. Tabor
Densidade de corrente 0,75 mA/cm²
Metal de base: prata depositada sobre vidro

tempo de electrólise e correspondentes a uma dada intensidade de corrente. No mesmo gráfico ainda está também representada a curva da evolução da tensão catódica em função do tempo. A forma desta curva sugere que a composição deva variar ràpidamente no início da electrólise. As curvas das % mostram também que a variação dos teores de zinco e de enxofre é pràticamente constante ao fim de certo tempo (dependente da densidade de corrente) durante o qual a % de níquel continua ainda a crescer Isto mostra, portanto, *que as camadas não são uniformes em profundidade.*

Aliás a heterogeneidade é vantajosa e por isso é ainda provocada. Tabor e colaboradores prepararam também camadas duplas e triplas (com outro metal interposto), sendo as primeiras obti-